Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Sollen wir jetzt nur noch Mineralwasser zu uns nehmen? Wer in diesen Monaten der BSE-Krise jedes Panikgeflatter in den Medien verfolgte und ernst nahm, dem vergällte sich die Lust auf alles und jedes: Rind, Kalb, Schwein (wegen Hormonmast, Maul- und Klauenseuche), Hirsch (in den USA) und Honig (wegen Streptomycin) – bald auch auf Milch oder Joghurt. Die verwirrten Zeitgenossen warten jetzt nur noch auf Hühnerwahnsinn, Fischseuche und Gemüsepest.

Unzureichend untersucht sind vor allem die Übertragungswege vom Rind bis zum Menschen, wo der BSE-Erreger die neuartige Creutzfeldt-Jacob-Krankheit auslöst. Jetzt rächt sich die irrige Annahme, dass sich BSE nicht auf den Menschen überträgt – nur weil sich an der verwandten Traberkrankheit der Schafe nie jemand angesteckt hat. „Man darf sich eben nie sicher sein“, äußerte kürzlich der Max-Planck-Präsident Hubert Markl gegenüber der „Welt“, „wenn man mit einer neuen Krankheit konfrontiert wird“. Doch nun darüber zu klagen, dass zur Übertragung des Rinderwahnsinns fast zwanzig Jahre Forschung versäumt wurden (so lange ist die Krankheit bekannt), hilft niemandem. Hauptsache, jetzt geschieht wenigstens das Richtige.

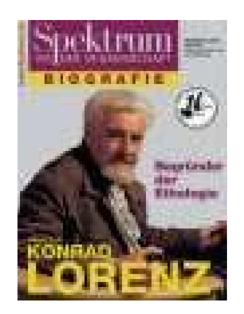
Bisherige Tests haben große Schwachpunkte: Die krankhaft veränderten Eiweißmoleküle („Prionen“), die BSE verursachen, können nur an geschlachteten Tieren und frühestens wenige Monate vor Ausbruch der Krankheit nachgewiesen werden. Wegen der mehrjährigen Inkubationszeit bieten heutige Schnelltests auch keine absolute Sicherheit: Negativ getestete Tiere könnten dennoch erkrankt sein, nur unterhalb der Nachweisgrenze. Ihr Gehirn enthält dann unter Umständen immer noch genug Prionen, um infektiös zu sein.

Es fehlt an Tests, die wesentlich empfindlicher sind und deshalb früher anschlagen, wenn möglich am lebenden Rind. Daran wird emsig gearbeitet. Auch Manfred Eigen berichtet in seinem Beitrag ab Seite 40 über entsprechende Bemühungen. Der Chemie-Nobelpreisträger von 1967 entwickelt derzeit einen BSE-Test, der verspricht, millionenfach empfindlicher zu sein als die bisherigen Verfahren. Das würde nicht nur eine frühere Entdeckung von BSE ermöglichen; es würde sich erstmals sogar mit absoluter Sicherheit feststellen lassen, ob bei einem bestimmten Tier eine Infektion vorliegt.

Herzlich Ihr







Zwei neue Spektrum-Sonderhefte sind seit kurzem auf dem Markt: Der „Vorstoß in den Mikrokosmos“ mit einem Überblick über aktuelle Themen aus der Teilchenphysik; außerdem die Biografie „Konrad Lorenz“. Der österreichische Verhaltensforscher war dem Publikum nicht nur als „Gänse-Vater“ bekannt. Auch als brillanter Buchautor und Zivilisationskritiker erlangte er Popularität weit über sein Fachgebiet hinaus.

INHALT



TITELTHEMA: RINDERWAHNSINN

BSE und das Prionen-Problem

Seite 40

Von Manfred Eigen

Gängige BSE-Tests können zwar zeigen, ob geschlachtete Tiere an Rinderwahnsinn in fortgeschrittenem Stadium erkrankt waren. Sie sind aber nicht annähernd empfindlich genug, um festzustellen, ob ein Stück Fleisch beim Metzger wirklich unbedenklich ist. Diese letzte Sicherheit versprechen erst neue Tests, die auf tieferen Einsichten in Vermehrungsmechanismus und -geschwindigkeit der BSE-Erreger beruhen.

MENSCHENAFFEN

Die Kultur der Schimpansen

Seite 30

Von Andrew Whiten und Christophe Boesch

Die Menschenaffen verblüffen immer wieder mit unerwarteten geistigen Leistungen. In letzter Zeit erregten die Schimpansen mit tradiertem Verhalten Aufsehen. Jede ihrer Populationen pflegt anscheinend eigene Gewohnheiten. Sahen so auch die Wurzeln menschlicher Kulturen aus?

SERIE KOSMOLOGIE (TEIL II)

Der Nachhall des Urknalls

Seite 50

Von Robert R. Caldwell und Marc Kamionkowski



Winzige Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung könnten Spuren von Gravitationswellen sein, die das Universum kurz nach dem Urknall erschütterten. In naher Zukunft sollen speziell dafür konstruierte Satelliten-Sonden nach solchen Spuren suchen.



MEDIZIN

Alkohol – das unterschätzte Gift

Seite 58

Von Stephan Teyssen und Manfred V. Singer

Welche medizinischen Risiken schon kleine Mengen alkoholischer Getränke bergen, ist wenig bekannt. Regelmäßiger Konsum erhöht die Gefahr für zahlreiche Krankheiten. Gemessen an seinen gesundheitlichen, sozialen und gesellschaftlichen Auswirkungen ist Alkohol in unserer Kultur die Droge Nummer eins.

PHYSIKGESCHICHTE

100 Jahre Quantentheorie

Seite 68

Von Max Tegmark und John Archibald Wheeler

Keine physikalische Theorie ist präziser – und keine wirft zur Frage, was da eigentlich gemessen wird, ähnlich knifflige Interpretationsprobleme auf. Jetzt zeichnet sich unter dem Begriff „Dekohärenz“ eine schlüssige Lösung ab.

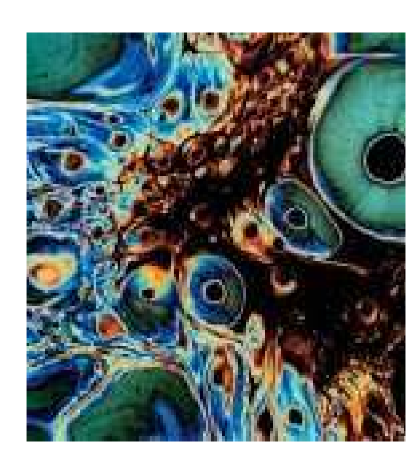
KUNST

Bilder, die sich selber malen

Seite 78

Von Volkhard Stürzbecher

Physikalische oder chemische Prozesse sind nicht nur kompliziert, sondern auch vom künstlerischen Standpunkt aus sehr interessant. Anstelle einer absichtsvollen Gestaltung begnügt sich der Künstler damit, die Bedingungen für einen von selbst ablaufenden Prozess zu setzen.





Voland (links) und Eckensberger

STREITGESPRÄCH

Gene und Verhalten

Seite 96

Mit Eckart Voland und Lutz H. Eckensberger

Die Entzifferung des menschlichen Genoms regt die Fantasie an: Hängt auch unser Handeln primär von den Genen ab? Was treibt den Menschen an? Mit Spektrum diskutierten der Soziobiologe Eckart Voland und der Kulturpsychologe Lutz H. Eckensberger.

Spektrum-Report:

Spuren des Lebens

Seite 86

Archäologische Überreste von Menschen, Pflanzen und Tieren sind ein vergängliches und daher umso wertvolleres Gut. Naturwissenschaftliche Methoden entlocken den Knochen, Zähnen, Haaren oder Pflanzenfasern neue Informationen.

Themen:

- Bäume als Zeitzeugen
- Das Rätsel der „unbekannten Frau“
- Fleisch, Fisch oder Gemüse

Technogramm:
Klimaforschung
Ancient DNA
Nahrungsanalyse



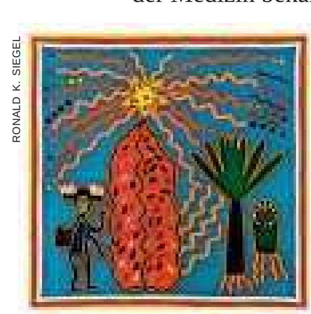
Hauptübersicht

Wenn das Gehirn aus der Balance gerät – Dezember 2000

Göttliche Stimmen

Beim Studium der Biografie über Jeanne d'Arc ist mir dieser Satz aufgefallen: „Mediziner meinen, dass manche göttlichen Visionen, etwa die Erscheinungen der Hildegard von Bingen, durch Migräneanfälle verursacht waren". Bekanntlich fühlte sich auch die „Jungfrau von Orleans" durch „göttliche Stimmen" zu ihrer Mission berufen. Sind mögliche Erklärungen dieses Phänomens, speziell der Halluzinationen, aus Sicht der Medizin bekannt?

Dr. R. Müller-Fiedler, Leonberg


RONALD K. SIEGEL

Vision unter Drogeneinfluss

Antwort von Dr. Erich Kasten:
Das Hören göttlicher Stimmen wie auch Erscheinungen des Teufels in der Lebensbeschreibung mancher Heiliger kann sicherlich in vielen Fällen durch akustische oder durch visuelle Halluzinationen erklärt werden. Angefangen bei Jeanne d'Arc bis zur Versuchung des heiligen Hieronymus gibt es eine Fülle psychologischer Theorien und möglicher Diagnosen der Betroffenen. Dabei muss es sich nicht gleich um Geisteskrankheiten handeln. Bei Eremiten mag z. B. die völlige Isolation dazu geführt haben, dass sie halluzinatorische Episoden entwickelten. Bekanntlich litten auch viele der im Mittelalter durch die Inquisition angeklagten Personen unter psychischen Störungen wie Epilepsie, Schizophrenie und Demenz.

Nahtod-Erfahrungen

Der Artikel erweckt den Anschein, als ob alle subjektiven Erlebnisse an der Todesschwelle als Störungen der Interaktivität von Hirnregionen erklärt werden könnten. Diese These kann nicht für alle Beobachtungen auf diesem Gebiet als Erklärung dienen. Günter Ewald berichtet z. B. in einem seiner Bücher von einem Mann, der während einer Operation einen Herzstillstand hatte. Nach seinem Wiedererwachen beschrieb er sein Lösen vom materiellen Körper und Umherwandern im Operationssaal. Er konnte sich an verifizierbare Einzelheiten wie die Angaben auf einem Typenschild eines medizinischen Gerätes genau erinnern, ohne je vorher oder nachher in diesem Raum gewesen zu sein.

Dass Personen nach der Reanimierung aus einem klinisch toten Zustand solche verifizierbaren Erinnerungen mitbringen können, ist inzwischen in dem noch relativ jungen Forschungsgebiet der Thanatologie eindeutig belegt. Diese Beobachtungen dürfen deshalb nicht mehr verschwiegen werden, wenn man eine Erklärung zu Nahtod-Erfahrungen sucht.

Claus Speer, Heilbronn

Antwort von Dr. Erich Kasten:
Wissenschaft kann nicht alles erklären und das ist vielleicht auch ganz gut so. Auch mir sind u. a. von Elisabeth Kübler-Ross oder Patrice van Eersel eine Fülle von Beschreibungen der Erlebnisse reanimierter Personen bekannt, die Dinge berichteten, die sie gar nicht hätten wissen können. Die Near-Death-Studies geben vielen Menschen Hoffnung, dass es doch noch etwas gibt, das weit über unsere rein biologische Existenz hinausreicht. Es war nicht die Absicht des Artikels, solche Hoffnungen zu zerstören, sondern lediglich zu versuchen, das wissenschaftlich zu erklären, was für uns erklärbar ist.

Krankheiten durch Treibhauseffekt
Dezember 2000

Eine Temperaturerhöhung verbessert die Chancen von Erregern, die einen Teil ihres Lebenszyklus außerhalb des menschlichen Organismus verbringen. Dagegen ist die Vermehrung der Stechmücken nicht von der Temperatur, sondern vom Wasser abhängig, solange es nicht gefroren ist. In trockener werdenden Gebieten sinkt deshalb das Infektionsrisiko sogar. Beispielsweise gibt es in der Sahara keine Malaria, aber während der kältesten Epoche der kleinen Eiszeit war sie eine der häufigsten Todesursachen in England. Sie verschwand im 19. Jahrhundert, obwohl es wärmer wurde, weil man die Sumpfgebiete trockenlegte.

Ebenso wenig sind die Hantavirus-Ausbrüche durch Nagetiere oder die Cholera-Erkrankungen durch kontaminiertes Trinkwasser die Folgen einer Temperaturerhöhung, sondern durch menschliche Inkompetenz und verschiedene ökologische Faktoren bedingt.

Prof. Dr. Dr. Hans E. Müller, Braunschweig

Das Ende des freien Willens?
Februar 2001

Erkenne dich selbst

Schon die alten Griechen haben gemeint, dass die Erkenntnis des Menschen immer nur eine auf sich selbst zurückgebogene Selbsterkenntnis sein kann. Die Inschrift des Apollotempels „Erkenne dich selbst" beschreibt, und darin besteht die Genialität ihrer sprachlichen Gestaltung, sachlich und grammatikalisch einen auf sich selbst zurückführenden Kreis. Aus dieser Kreisstruktur gibt es kein Ausbrechen. Das hängt damit zusammen, dass der Geist nur vom Geist erkannt werden kann. In der Erforschung der Außenwelt und ihrer physikalischen Gesetze wird der menschliche Geist, auch wenn er die neurophysiologischen Abläufe innerhalb des menschlichen Gehirns erforscht, immer nur die Außenwelt erkennen, niemals aber sich selbst.

Reiner Vogels, Essen

Generator von Bedeutungen

Im Gehirn als Forschungsobjekt lassen sich mittels naturwissenschaftlicher Methodik weder sinnhafte Zuschreibungen (Bedeutungen!) noch kulturelle „Konstrukte" auffinden. Das kommt daher, weil naturwissenschaftliche Beschreibungen oder Modelle keine Bedeutungen zu geben vermögen. Auf derselben Ebene liegt auch die Unfähigkeit der Naturwissenschaft, dem freien Willen das ihm Eigene zu geben, ihn nämlich als das zu erkennen, was er eigentlich ist: ein Generator von Bedeutungen. Dass wir den freien Willen subjektiv als Realität sui generis an uns wahrnehmen, ist selbst eine Folge der Bedeutungen, welche verschiedene Gehirnprozesse einander geben und durch die sie sich zur Wirklichkeit des Bewusstseins vermitteln.

Dr. Walter Rella, Gloggnitz

Verantwortung einfordern

Wenn auch in dem Interview die Konsequenzen der eher wissenschaftlichen Betrachtung beispielsweise auf den Strafvollzug als recht positiv dargestellt werden, so teile ich diese Meinung absolut nicht. Eine Gesellschaft, in der die Reduktion des Gefährdungspotenzials von Straftätern mit der gleichen Logik behandelt wird wie die Optimierung der

Sicherheit einer Maschine, erscheint mir keinesfalls menschlicher als das Annehmen meines Nächsten als vollwertigen Menschen, der verantwortlich handeln kann und dessen Verantwortung ich einfordern kann.

Harald Huber, Remseck

Materialistische Ideologie

Was Naturwissenschaft ihren eigenen Kriterien zufolge erkennen kann, ist quantifizierbare, empirische Realität. Alles andere überschreitet ihre Kompetenz und wird dann naturwissenschaftlich eingeschränkte „Philosophie“, d. h. materialistische Ideologie, die als solche naturwissenschaftlich unüberprüfbar ist und in ihrer Verabsolutierung irrational wird: Die Erkenntnis wird hier operational definiert und „erkennt“ nun das, was sie schon vor dem Erkenntnisprozess als wahr sein sollend angenommen hat, nämlich hier, dass der Wille als frei nicht erkennbar sei (bzw. unfrei sei).

Das Objekt der Naturwissenschaft ist die sinnlich (bzw. mathematisch-physikalisch) gegebene Faktizität; sie kann, wie uns die Quantentheorie lehrt, letztlich nur mit Wahrscheinlichkeitsgesetzen und in Abhängigkeit von der Beobachtung erfasst (nicht erklärt) werden. Freiheit und Geist, als absoluter Grund jeder Erkenntnis, können hier prinzipiell nicht sichtbar werden und fallen somit operational definiert notwendig heraus.

Dr. J. K. Reisinger, Buchloe-Lindenberg

Ursache und Wirkung

Beim Hören von Musik beobachtet der Neurologe selektiv aktive Strukturen unseres Gehirns, beim Lesen des Interviews sind es wiederum andere Regionen und Strukturen, die aktiviert werden. Könnte es da nicht sein, dass erst die Wechselwirkung zwischen der Wahrnehmung der Umwelt über Sinneseindrücke einerseits und den von Prof. Singer aus der Dritte-Person-Perspektive beschriebenen Prozessen andererseits das ergeben, was wir als freien Willen erleben? Das Prinzip der Wechselwirkung ist in der Natur weit verbreitet und in der Entwicklung der lebenden Natur sogar dominant. Es würde jedenfalls die Behauptung, dass alle Prozesse im Gehirn deterministisch sind, klar widerlegen.

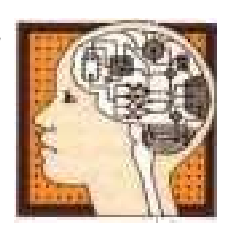
Dr. Dieter Frei, Seuzach

Denkfehler des 19. Jahrhunderts

Wie kann man meinen, ein geistiges Prinzip wie den freien Willen materiell ausmessen zu können, mit der kategorischen Behauptung, ihn nicht gefunden zu haben und damit auszuschließen! Damit verfällt die Hirnforschung doch in den Denkfehler der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts, alles Geschehen sei determiniert und grundsätzlich vorausberechenbar – bei Kenntnis aller Anfangsbedingungen, was von der Quantenphysik einschließlich der Heisenbergschen Unschärferelation und der Chaostheorie längst widerlegt ist.

Prof. Paul Kalbhen, Gummersbach

Gehirn als Maschine



Die Nicht-Existenz des freien Willens bedeutet offenbar, dass es möglich ist, das menschliche Gehirn als eine deterministische Maschine zu erklären. Techniker denken hier vielleicht an ein abstraktes Automaten-Modell, z. B. eine Zustands-Übergangs-Maschine. Man muss zugeben, dass die Anzahl der inneren Zustände enorm groß ist, und dass Zustände aus sich selbst heraus oder durch äußere Einflüsse (Sinne) dynamisch generiert werden können. Diese deterministische Sichtweise erklärt jedoch nicht das Phänomen des Lebens.

Herbert Haas, Würflach (Österreich)



Prof. Wolf Singer antwortet:

Die verkürzte Wiedergabe eines mehrstündigen Gesprächs über ein so schwieriges Thema gibt notwendig Anlass zu Missverständnissen und Überinterpretationen, weil die Aussagen nicht sorgfältig begründet werden können. Jedoch bleibt das Problem, dass unsere subjektive Erfahrung, ein autonomes geistiges Wesen zu sein, das über freien Willen verfügt, mit den derzeitigen Erkenntnissen der Hirnforschung nicht vereinbar ist. Es kann durchaus sein, dass unsere naturwissenschaftlichen Beschreibungssysteme nicht vollständig sind und zukünftige Entdeckungen zu einer anderen Sichtweise zwingen. Nur ist gegenwärtig nicht vorstellbar, welcher Natur die Phänomene sein müssten, die es noch zu entdecken gilt, um diese Inkompatibilität aufzuheben.

In vielen Briefen wird die Meinung vertreten, das Problem des freien Willens ließe sich lösen, wenn man unterstellt, im Gehirn kämen Prinzipien zum Tragen, wie wir sie in der Quantenphysik oder in komplexen Systemen mit chaotischen Eigenschaften kennen. Es ist in der Tat sehr wahrscheinlich, dass Hirnfunktionen auf nicht-linearen dynamischen Prozessen beruhen. Doch sind auch diese deterministisch und die Konsequenz ist lediglich, dass langfristige Voraussagen über das Verhalten des Systems nicht möglich sind, weil unkontrollierbare Variablen mit probabilistischen Eigenschaften den Übergang vom vorangehenden zum je nächsten Zustand mit beeinflussen. Dies macht uns jedoch nicht frei, da dann der je nächste Akt nicht nur vom vorangehenden Gesamtzustand des Systems, sondern zusätzlich noch von zufälligen Schwankungen abhängt.

Ferner gibt es zur Zeit keinerlei Anhaltspunkte dafür, dass Gesetzmäßigkeiten, wie sie in der Quantenwelt gelten, für die Informationsverarbeitung im Gehirn von Bedeutung wären. Aber selbst, wenn sich solches herausstellte, würde die damit verbundene Undeterminiertheit bestimmter Prozesse noch keinen Raum für einen freien Willen schaffen, der unabhängig von allen materiellen Wechselwirkungen entscheidet und dann auf die neuronalen Prozesse so einwirkt, dass diese ausführen, was der Wille wollte.

Eine Fülle von Beobachtungen legt nahe, dass unsere Begründungen für getroffene Entscheidungen oft nicht mit den tatsächlichen Motiven übereinstimmen, weil diese unbewusst geblieben sind. Dies zeigt, dass wir durchaus in der Lage sind, Entscheidungen als frei zu erfahren, obgleich sich nachvollziehen lässt, welche Reize die Reaktion ausgelöst haben, die als intentionaler Akt empfunden wird. Für solche Vorgänge gibt es neurobiologische Erklärungen.

Sollte hingegen zutreffen, dass es die freie, von neuronalen Vorgängen unabhängige Entscheidung gibt, die jedem neuronalen Vorgang vorausgeht und diesen dann lediglich in Gang setzt, damit die beschlossenen Aktionen ausgeführt werden, dann müssen wir etwas annehmen, was in keinem der bislang bekannten naturwissenschaftlichen Beschreibungssysteme vorkommt. Die Frage nach der Existenz und möglichen Natur dieses Etwas entzieht sich dem naturwissenschaftlichen Zugriff. Sie war deshalb auch nicht Gegenstand des Interviews. Hier ging es lediglich darum, das Konzept des freien Willens aus der Perspektive der Neurowissenschaften zu behandeln und sie in den Kontext des derzeit Wissbaren einzubetten. ▶

Wirbel in der Badewanne

Physikalische Unterhaltungen – Dezember 2000

Ein Wirbel auf der Nordhalbkugel müsste, wenn er von der Corioliskraft entscheidend beeinflusst würde, im Gegenuhrzeigersinn rotieren – so stellt es Wolfgang Bürger dar, und so zeigt es auch die computeranimierte Wetterkarte im Fernsehen. Das leuchtet mir nicht ein. Die Erde rotiert, von einem Punkt über dem Nordpol aus betrachtet, im Gegenuhrzeigersinn. Auf einer in dieser Richtung rotierenden Scheibe, und somit auch auf der Nordhalbkugel der Erde, erscheint jede geradlinige Bewegung einem mitrotierenden Beobachter nach rechts abgelenkt und gekrümmt. Bei einem Tiefdruckwirbel in der Atmosphäre sollte das zu einer Rotation führen, die von oben gesehen im Uhrzeigersinn verläuft, weil sich die Volumenelemente der Luftmassen auf rechtsgekrümmten Bahnen von der Peripherie her in das Zentrum hinein bewegen. Wie ist der Widerspruch aufzuklären?

Prof. Dr. Wilhelm Glaser, Tübingen

Antwort des Autors:

Offensichtlich ist der Drehsinn des Abflusswirbels, soweit er von der Achsendrehung der Erde bestimmt wird, überall auf der Nordhalbkugel gleich. Also dürfen wir zur Entscheidung der Alternative „Rechts- oder Linksdrehung“ unsere Badewanne mit der Abflussöffnung direkt über dem Nordpol aufstellen (vorsichtshalber im Sommer, damit das Wasser nicht gleich gefriert). Während das Wasser aus der Sicht eines neben der Wanne stehenden Beobachters stillsteht, sieht ein zweiter Beobachter, der darüber schwebt und die Rotation der Erde nicht mitmacht, die (mit Lykopodiumsamen markierten) Wasserteilchen auf Kreisen um den Pol laufen, mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und daher umso schneller, je weiter sie von der Abflussöffnung entfernt sind. Wird nun der Stöpsel gezogen, so strömt das kreisende Wasser auf den Abfluss zu. Die schneller kreisenden Teilchen von außen bilden weiter innen einen Abflusswirbel, durch den das Wasser im gleichen Drehsinn wie die Erde, aber mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit in das Loch strudelt, auf der Nordhalbkugel entgegen dem Uhrzeiger. Tiefdruckgebiete sind entsprechende Abflusswirbel in der Atmosphäre. In sie strudelt Luft hinein – auf der nördlichen Hemisphäre entgegen dem Uhrzeiger (Bild). Alle Beobachtungen werden leichter durchschaubar in einem Bezugssystem, das die Drehung der Erde um ihre Achse nicht mitmacht und dadurch Begriffe wie „Corioliskraft“ ganz vermeidet.

Prof. Dr. Wolfgang Bürger, Karlsruhe



DEUTSCHER WETTERDIENST

Sturmtief „Lothar“ über Deutschland

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Erratum

Physikalische Unterhaltungen – Februar 2001

Im Kasten „Bilanz der Molekülstöße“ auf S. 106 muss es in der drittletzten Zeile $0{,}9\times10^{-5}$ (nicht $0{,}9\times10^{5}$) Newton pro Quadratmeter heißen. Wäre die gedruckte Angabe richtig, so würde das Licht der Sonne einen Menschen nicht nur zu Boden werfen, sondern zerquetschen (bei einer Querschnittsfläche von einem halben Quadratmeter wäre die Kraft des Sonnenlichts gleich dem Gewicht eines 5-Tonnen-Lastwagens).

Red.

Ein Spalt und seine Folgen

Monatsspektrum – Dezember 2000

In dem Artikel zum Nobelpreis für Medizin heißt es, dass Carlssons Erkenntnis 1967 von George C. Cotzias am Brookhaven-Nationallaboratorium in Upton zu einer medikamentösen Behandlung umgesetzt wurde. Leider erwähnt der Artikel nicht, dass die therapeutische Wirksamkeit von L-DOPA an Parkinson-Patienten bereits im Jahr 1961 von W. Birkmayer und O. Hornykiewicz in Wien demonstriert worden war.

Michael Berger, Wien

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator)
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 504-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Riemann, Dr. Michael Springer
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758; Verkaufsberatung: Sabine Ebert, Tel. (06221) 504-749, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Michael Albrecht, Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Gruner & Jahr, Hamburg und Spotlight Verlag, München. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

NANOTECHNOLOGIE

Rasterkraftmikroskop sieht erstmals ins Innere des Atoms

Mit einem neuartigen Messfühler in Form einer Stimmgabel ist es gelungen, eine Siliziumoberfläche mit bisher nicht erreichter Auflösung abzutasten und sogar einzelne Elektronenwolken sichtbar zu machen.

Von Franz J. Gießibl

Die Nanotechnik erobert stürmisch das Terrain der einzelnen Moleküle und Atome. Rastersondenverfahren sind die Instrumente zu diesem Vorstoß in die Nanowelt. Mit ihnen lässt sich der Kosmos des Kleinen zugleich erkunden und manipulieren.

Gerd Binnig und Heinrich Rohrer entwickelten schon 1981 am IBM-Labor in Rüschlikon (Schweiz) das erste Werkzeug dieser Art: das Rastertunnelmikroskop. Dabei wird eine winzige Elektrosonde rasterartig so dicht über eine leitfähige Oberfläche geführt, dass Elektronen den Zwischenraum gleichsam überspringen können – oder „durchtunneln", wie Quantenmechaniker sagen. Da die resultierenden Tunnelströme sehr empfindlich auf den Abstand reagieren, lassen sich extrem genaue Oberflächenkarten erstellen. Schon 1983 gelang es auf diese Weise, erstmals einzelne Atome sichtbar zu machen. Nur drei Jahre später wurde die Erfindung des Rastertunnelmikroskops denn auch mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Zur selben Zeit stellten Binnig und sein Mitarbeiter Christoph Gerber gemeinsam mit Calvin F. Quate von der Universität Stanford (Kalifornien) bereits eine Weiterentwicklung vor, die unsere Wahrnehmung der Nanowelt um eine neue Sinnesqualität bereicherte: das Rasterkraftmikroskop. Es hat den Vorteil gegenüber dem Tunnelmikroskop, dass die untersuchte Oberfläche nicht elektrisch leitend sein muss. Ansonsten funktioniert es ganz ähnlich. Mit einer extrem dünnen Spitze tastet es eine Oberfläche ab und misst dabei statt der Tunnelströme die feinen Anziehungs- und Abstoßungskräfte, die in unmittelbarer Nähe der Atome auftreten. Die Spitze befindet sich am freien Ende eines Federbalkens, der durch diese Kräfte verbogen wird. Die Verbiegung kann mit einem Laserstrahl oder piezoelektrisch gemessen werden.

Das Rasterkraftmikroskop wurde schnell zu einem unentbehrlichen Instrument in der Forschung und in der Qualitätskontrolle industriell gefertigter Oberflächen. Doch es dauerte fast ein Jahrzehnt, bis es atomare Auflösung erreichte.

Das hatte mehrere Gründe. So ist im Unterschied zum Tunnelmikroskop, bei dem der Tunnelstrom stetig zunimmt, wenn sich die Spitze der Probe nähert, beim Kraftmikroskop die Kraft zunächst anziehend, dann abstoßend. Dieser Richtungswechsel macht es sehr schwer, einen Regelkreis zu realisieren, der durch Nachführen des Abstandes die Verbiegung und damit die Kraft konstant hält.

Zudem sind die Kräfte zwischen Spitze und Probe extrem klein: Sie betragen maximal ein Nano-Newton. Da die damaligen Federbalken Federkonstanten von einigen Newton pro Meter hatten, verbogen sie sich nur um Nanometer. Solche winzigen Auslenkungen werden leicht von Störeinflüssen überlagert – etwa temperaturbedingte Längenänderungen oder Kriechen des Materials.

Außerdem wird die Spitze so dicht über die Probe geführt, dass sie diese quasi berührt. Dadurch kann sie bei weichen Materialien Oberflächenstrukturen beschädigen oder gar zerstören. Eine Schwierigkeit besteht schließlich darin, dass durch die Anziehungskräfte beim Annähern der Spitze an die Oberfläche eine Instabilität im Federbalken auftritt: der so genannte „Sprung zum Kontakt". Er lässt sich nur vermeiden, wenn der Federbalken steifer ist als die „Steifigkeit" der Anziehungskraft zwischen Spitze und Probe.

Von der Stimmgabel zur Rastersondenspitze

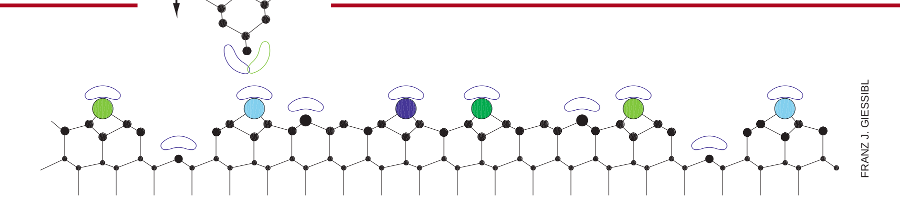
Mit einem neuartigen „qPlus-Sensor", wie ihn die Autoren genannt haben, erreicht die Rasterkraftmikroskopie erstmals Auflösungen bis in den subatomaren Bereich. Der Messfühler besteht aus einer Quarzstimmgabel, deren eine Zinke auf einem Substrat befestigt ist, während die andere eine extrem feine Spitze zum Abtasten der abzubildenden Oberfläche enthält. Die Stimmgabel wird in Schwingung versetzt und dicht über die Oberfläche geführt. Da Quarz piezoelektrisch ist, fließen Ladungen, wenn sich die freie Zinke verbiegt. Diese werden von den goldenen Kontaktflächen aufgenommen und weitergeleitet. Bei Annäherung der Spitze an die Oberfläche treten je nach Abstand zuerst Anziehungs- und dann Abstoßungskräfte auf, durch die sich die Schwingungsfrequenz erniedrigt beziehungsweise erhöht. Indem man die Frequenz als Stellglied eines Regelkreises verwendet, kann man die Spitze also in einem konstanten Abstand über die Oberfläche führen und diese so abtasten.



FRANZ J. GIESSIBL

Messung mit schwingender Spitze

Ein Team um Tom Albrecht vom IBM-Labor Almaden (Kalifornien) fand 1991 eine Möglichkeit, einige dieser Probleme zu umgehen. Dazu versetzte es den Federbalken in Resonanzschwingung. Deren Frequenz hängt normalerweise nur von der Masse und Federkonstante des Federbalkens ab. Sie ändert sich aber beim Annähern an die Probe: Anziehungskräfte verringern, Abstoßungskräfte erhöhen sie. Als ich 1994 bei der Firma Park Scientific Instruments in Sunnyvale (Kalifornien) in diesem dynamischen Modus Siliziumoberflächen untersuchte, erreichte ich



FRANZ J. GIESSIBL

Um die Anzahl der unabgesättigten Bindungen zu minimieren, ordnen sich die Atome an der Oberfläche eines Siliziumkristalls anders an als im Inneren. Es entsteht eine siebenfach größere rautenförmige Elementarzelle (rechts). Die Atome der äußersten Schicht liegen nicht exakt in einer Ebene; ihre leicht unterschiedlichen Höhenpositionen sind farbig codiert. Die Seitenansicht (oben) zeigt zusätzlich das vorderste Siliziumatom auf der Spitze der darüber hinweg gleitenden Rasterkraftsonde und die nierenförmigen Orbitale („Wolken“) der ungebundenen Elektronen.

erstmals mit einem Rasterkraftmikroskop atomare Auflösung. Die Federkonstante des Federbalkens betrug damals 17 Newton pro Meter, die konstant geregelte Schwingungsamplitude 34 Nanometer.

Dies waren reine Erfahrungswerte, und es stand keineswegs fest, dass sie optimale Auflösung garantierten. Deshalb packten 1996 Jochen Mannhart, Hartmut Bielefeldt, Stefan Hembacher und ich am Lehrstuhl Experimentalphysik VI der Universität Augsburg das Problem zunächst von der theoretischen Seite an. Das Resultat war überraschend: Optimale Auflösung sollte man mit Schwingungsamplituden von Bruchteilen eines Nanometers erreichen! Das wiederum erfordert erheblich steifere Federbalken mit einer Federkonstanten von einigen hundert Newton pro Meter.

Das Ergebnis ermutigte uns zu einem kühnen Schritt. Wir bauten unsere eigenen Kraftsonden auf der Grundlage eines alltäglichen Massenprodukts: Quarzstimmgabeln. Sie werden als Zeitgeber für Quarzuhren in Milliardenstückzahlen pro Jahr hergestellt. Die Anforderungen, denen sie dabei genügen müssen, machen sie auch zu idealen Sensoren für die Kraftmikroskopie: Wenig Energieverbrauch bei der Uhr entspricht einer sehr geringen Schwingungsdämpfung, und eine hohe Ganggenauigkeit verheißt eine äußerst konstante Frequenz. Zudem liefern piezoelektrische Quarzstimmgabeln ein Wechselstromsignal, das über ihren momentanen Schwingungszustand informiert. Dadurch erübrigt sich die aufwendige Kombination mit einer optischen Methode.

Natürlich waren andere Physiker schon vor uns auf die Idee gekommen, Quarzstimmgabeln für Rastersondenverfahren umzuwidmen. Doch sie montierten sie ähnlich wie in einer Quarzuhr, in der beide Zinken schwingen. Wirkt nun auf eine davon eine Kraft, so geraten sie aus dem Takt, und die Schwingung wird gedämpft. Um das zu verhindern, fixierten wir eine Zinke auf einer Unterlage und montierten auf der anderen die Messspitze. Diese neuartige Kraftsonde nannten wir den qPlus-Sensor (siehe Kasten). Er hat eine Federkonstante von 1800 Newton pro Meter und erlaubt stabile Schwingungen mit winzigen Amplituden von 0,3 bis 1,0 Nanometern. Jetzt hatten wir ein Kraftmikroskop mit optimaler Auflösung – falls unsere Theorie stimmte.

Als Untersuchungsobjekt wählten wir die Oberfläche eines Siliziumkristalls. Sie ist für die Chip- und Halbleiterindustrie das Objekt der Begierde und wegen ihrer Komplexität zugleich eine Herausforderung. Erst das Rastertunnelmikroskop konnte ihren atomaren Bau enthüllen. Dabei zeigte sich, dass die Atome an der Oberfläche anders angeordnet sind als im Kristallinnern. Die Anzahl der unabgesättigten Bindungen wird durch eine besondere Struktur minimiert, die Fachleute die 7x7-Rekonstruktion der Silizium(111)-Oberfläche nennen. Sie hat eine siebenmal größere Elementarzelle als der Kristall im Inneren (Bild links).

Als wir mit unserem neuen Kraftmikroskop diese atomare Landschaft abtasteten, erhielten wir Bilder von zuvor unerreichter Präzision. Aus Modellrechnungen wussten wir, dass die Oberflächenatome der erweiterten Elementarzelle nicht in einer Ebene liegen, sondern in verschiedenen Höhen. Tatsächlich konnten wir die erwarteten Höhenunterschiede in der Größenordnung von nur einem hundertstel Nanometer nachweisen.

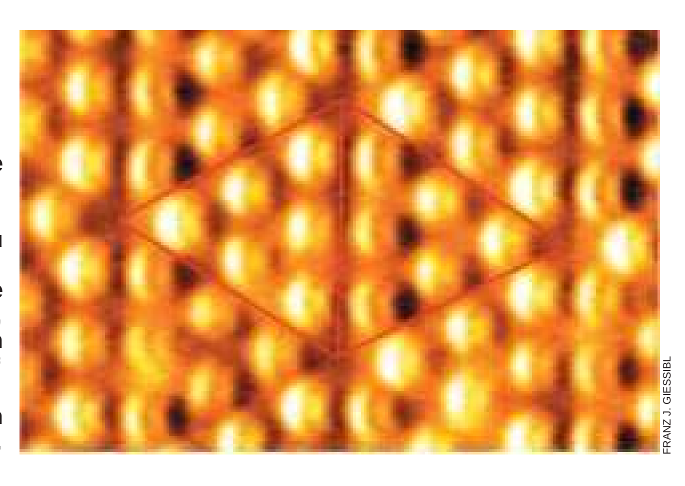
Doch damit nicht genug – die Rasterbilder bargen für uns eine besondere Überraschung: Wir sahen die Siliziumatome nicht als einheitliche Gebilde, sondern mit inneren Strukturen; ein jedes Atom zeigte zwei Höcker ungleicher Größe und Höhe (Bild unten).

Das Geheimnis der zwei Höcker

Zunächst dachten wir, dass unsere Sondenspitze nicht einatomig wäre, sondern an ihrem Ende zwei Siliziumatome trüge. Dann wären ebenfalls zwei Höcker zu sehen; doch die Lücke dazwischen müsste sehr viel größer sein. Zeigte das Rasterbild also subatomare Strukturen? Sorgsam prüften wir unsere Messergebnisse. Doch schließlich blieb uns nur die Erklärung, dass wir wirklich die Elektronenwolken von Silizium enthüllt hatten.

In Gegenwart möglicher Bindungspartner verteilen sich die Außenelektronen von Siliziumatomen auf vier so genannte sp^3-Hybridorbitale. Das sind energetisch günstige Mischzustände. Sie haben Keulenform und weisen in die vier Ecken eines Tetraeders. Sitzen die Sili- ▶

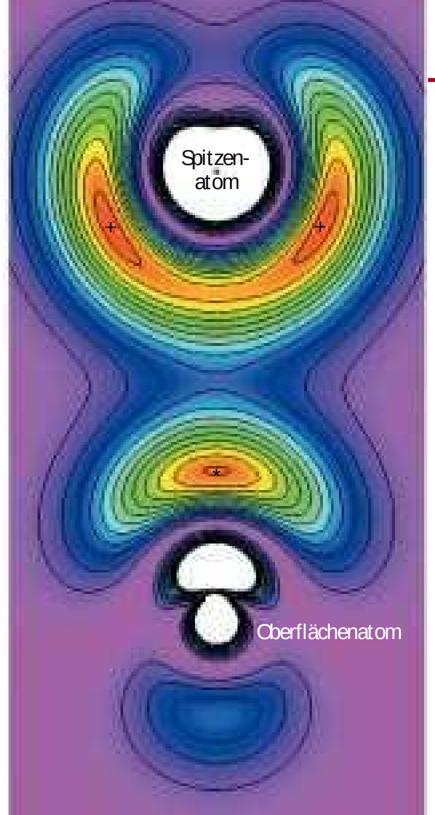
Das rasterkraftmikroskopische Bild einer Siliziumoberfläche zeigt genau die rautenförmige Elementarzelle des Modells und enthüllt deren atomaren Bau in zuvor unerreichter Präzision. Die Siliziumatome erscheinen als Doppelbilder, weil sie mit zwei Orbitalen eines einzelnen Atoms auf der Spitze des Kraftmikroskops wechselwirken (siehe Bild auf Seite 14).



FRANZ J. GIESSIBL



FRANZ J. GIESSIBL



Das Rasterbild eines einzelnen Atoms auf der Siliziumoberfläche erscheint als ungleiches Höckerpaar, das an einen Champignon erinnert (oben). Diese Verdopplung ist die Folge einer subatomaren Auflösung (rechts). Das vorderste Atom der Spitze streckt der Probenoberfläche zwei Orbitale entgegen (+), während vom Oberflächenatom nur ein Orbital absteht (*). Beim Abtasten wirken die beiden Elektronenwolken der Spitze wie zwei getrennte Messfühler, die jeweils ein eigenes Bild erzeugen. Wenn die Spitze leicht schräg steht, haben die beiden Höcker ungleiche Größe und Höhe. Die Elektronendichte der Orbitale ist farbig codiert – von grün über gelb nach rot zunehmend.

ziumatome an der Oberfläche eines Kristalls, so strecken sie eine unabgesättigte Elektronenkeule senkrecht aus ihr heraus. Demnach erscheinen sie von außen betrachtet als rotationssymmetrische Einheiten. Wenn dagegen ein einzelnes Siliziumatom eine Kristall-Ecke bildet, ragen zwei Elektronenkeulen nach außen.

Nun hatten wir die Spitze der Kraftsonde so präpariert, dass sie wahrscheinlich in ein einzelnes Siliziumatom mündete. Dieses streckte folglich den Oberflächenatomen zwei Elektronenkeulen entgegen. Und das war auch des Rätsels Lösung: Wir hatten eine einatomige Sondenspitze mit zwei subatomaren Messfühlern (Bild).

Bei der Rasterbewegung begegnet zuerst die eine, dann die andere Elektronenkeule dem gleichen Oberflächenatom. Das Mikroskop erspürt also pro Atom zwei Kraftmaxima: das ungleiche Höckerpaar des Rasterbildes. Diese Deutung stimmt gut mit den Abmessungen der Höcker überein. Ihre ungleiche Größe und Höhe lässt sich durch eine leichte Schräglage der Spitze erklären.

Von diesem Ergebnis waren wir selbst überrascht. Das neue Rasterkraftmikroskop hat eine Auflösung jenseits der atomaren Dimension erreicht. Es hat ein Fenster ins Subatomare aufgestoßen und Atomorbitale sichtbar gemacht.

Schon 1999 präsentierte zwar ein Team um Jian-Min Zuo von der Arizona State University in Tempe eine Aufnahme von Atomorbitalen, nachdem es einen Kupferoxid-Kristall einer trickreichen Mischung aus Elektronen- und Röntgenbeugung unterworfen hatte. Doch die Stichworte Kristall und Beugung sagen es bereits: Die sensationelle Aufnahme bedurfte der periodischen Anordnung vieler Atome und der komplizierten Analyse eines Beugungsmusters – einzelne Atome oder Moleküle lassen sich damit nicht beobachten.

Diese Vorgehensweise hat weiterhin ihre Berechtigung. Doch ihr entgehen die Atome, die aus der Reihe tanzen, die Störstellen in Kristallen und die zufällig verteilten Fremdatome. Diese individuellen Details, die Materialeigenschaften entscheidend beeinflussen, kann das Rasterkraftmikroskop sichtbar machen. Und künftig werden wir lernen, die chemische Natur und Position des Spitzenatoms der Kraftsonde genau zu kontrollieren. Dann wird es gelingen, mit noch kleineren Messfühlern in Gestalt definierter Atomorbitale Oberflächen noch feiner abzutasten. Damit stehen wir in der Oberflächenanalyse im doppelten Wortsinn vor einem Quantensprung. ■

Dr. Franz J. Gießibl leitet die Rastersondenmikroskopie-Gruppe am Lehrstuhl für Experimentalphysik VI von Prof. Jochen Mannhart an der Universität Augsburg. Er hat von 1988 bis 1992 bei Nobelpreisträger Gerd Binnig an der Universität München promoviert und vor kurzem seine Habilitationsschrift zum Thema Rasterkraftmikroskopie fertig gestellt. Für seine Beiträge auf diesem Gebiet wurde er letztes Jahr mit dem Deutschen Nanowissenschaftspreis ausgezeichnet.

NEUROPHYSIOLOGIE

ATP als Schmerzsignal

Überraschende neue Erkenntnis: Die Energie-Münze der Zelle dient nebenbei als Botenstoff, der Schmerzen bei Verletzungen sowie hohen Blasendruck signalisiert.

Von Michael Groß

Eines der wichtigsten kleinen Moleküle der Zellbiologie ist gemeinhin als ATP bekannt, die Kurzform für Adenosintriphosphat. Wie seine Verwandten GTP, CTP und TTP (Guanosin-, Cytidin- und Thymidintriphosphat) dient es als Rohmaterial für die Synthese der Erbsubstanz DNA. Schon 1941 fanden Herman Kalckar und Fritz Lipman allerdings heraus, dass es eine weitere, ebenso fundamentale Funktion hat: als Haupt-Energieträger der Zelle. ATP ist für die Zelle ebenso wichtig wie Elektrizität für unsere Haushalte.

Mitte der siebziger Jahre schließlich gab es Hinweise auf eine dritte Funktion von ATP – diesmal außerhalb der Zelle. Tirza Bleehen und Kollegen machten 1975 am Middlesex-Hospital in London eine überraschende Entdeckung: Wenn sie Versuchspersonen ATP-reiche Zellextrakte auf die Haut auftrugen, schmerzte die betreffende Stelle, als sei sie verletzt. Daraus schlossen die britischen Forscher, dass ATP anscheinend als Signalstoff an der Wahrnehmung von Schmerzen beteiligt ist.

Damit ein von außen kommendes Molekül eine Zelle beeinflussen kann, muss es von einem spezifischen Membranprotein erkannt werden. Erst 1995

ließ sich ein solcher Rezeptor für ATP aufspüren, vervielfältigen und näher untersuchen. Es war der dritte aus einer Familie von so genannten Purin-Nucleotid-Rezeptoren, die man P2X getauft hatte; folglich erhielt er den Namen P2X3.

Wie sich zeigte, tritt diese für ATP empfängliche Antenne ausschließlich in den Fortsätzen der für die Schmerzempfindung zuständigen Nervenzellen auf. An deren Enden bildet das Protein einen Membrankanal für positiv geladene Ionen, der vermutlich nur dann aufgeht, wenn er ein ATP-Molekül gebunden hat. Öffnen sich mehrere solcher Kanäle, so verschiebt sich die Verteilung der elektrischen Ladungen beiderseits der Membran. Dadurch entsteht ein elektrisches Signal, das die Nervenzelle an das Gehirn weiterleitet. Genau genommen, bildet P2X3 nur einen Teil dieses Kanals: Es tritt in der Membran üblicherweise im Verbund mit anderen Molekülen derselben Art oder mit seinen Verwandten aus der P2X-Familie auf.

Wenn die Blase drückt

Die Arbeitsgruppen von John Wood am Londoner University College und von Debra Cockayne bei der Firma Roche Biosciences in Palo Alto (Kalifornien) haben nun unabhängig voneinander Mäuse untersucht, denen dieser Rezeptor fehlt. Tatsächlich erwiesen sich diese Tiere als weniger empfindlich gegenüber Schmerzen – allerdings nur solchen, die von Gewebeverletzungen herrühren. Dies lässt sich objektiv messen, wenn man beobachtet, wie oft sich das Versuchstier die betroffene Pfote leckt. Auf schmerzhafte Erfahrungen ohne Gewebeverletzungen reagieren Mäuse mit und ohne P2X3 gleich stark.

Doch damit nicht genug: Wie die amerikanischen Forscher bemerkten, urinieren die mutierten Mäuse auch seltener als ihre normalen Artgenossen. Im Einklang mit anderen, bisher wenig beachteten Untersuchungen an isolierten Geweben deutet dies darauf hin, dass ATP auch als Blasendruck-Signal fungiert. Wie das? Offenbar setzt das Epithel, das die Blase einhüllt, ATP frei, wenn es sich ausdehnt. Benachbarte Nervenfortsätze, die mit dem Rezeptor ausgestattet sind, nehmen diese ATP-Ausschüttung wahr und melden sie dem Gehirn als Blasendruck weiter.

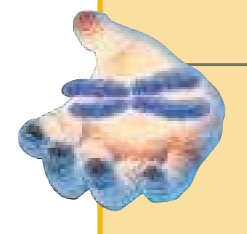
Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England).*

Die neuen Erkenntnisse lassen sich vielleicht auch praktisch nutzen. So ▶

könnten Hemmstoffe für den ATP-Rezeptor als Schmerzmittel dienen – etwa bei Unterleibsoperationen. Probleme dürfte dabei allerdings bereiten, dass so viele wichtige Körperfunktionen von der Funktion des ATP als Energieträger abhängen. Einen Hemmstoff zu entwickeln, der nur den Schmerz vermittelnden Rezeptor ausschaltet, alle anderen ATP-bindenden Proteine aber unbehelligt lässt, dürfte schwierig sein. Zudem deuten die Ergebnisse des britischen Teams an, dass beim Ausschalten des ATP-Rezeptors verstärkt Entzündungsreaktionen auftreten. All dies lässt befürchten, dass ein solches Schmerzmittel schwere Nebenwirkungen hätte.

Eine weitere überraschende Erkenntnis der britischen Forscher war, dass Mäuse ohne den ATP-Rezeptor offenbar unfähig sind, eine leichte, angenehme Erwärmung zu empfinden; jedenfalls zeigen sie keinerlei neuronale Reaktion darauf. Demnach könnte ATP auch am normalen Temperaturempfinden der Haut beteiligt sein. Eines hat sich damit zumindest gezeigt: Selbst ein kleines Molekül, das schon seit einem halben Jahrhundert in den Lehrbüchern steht, ist durchaus noch für Überraschungen gut. Fragt sich, welche es noch zu bieten hat. ■

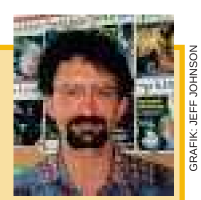
Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil VII)



Anlässlich der Entzifferung des menschlichen Erbguts stellen wir beispielhaft zwölf darin codierte Proteine vor.

Trypsin

Schere im Darm



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England)*

Schneidwerkzeuge wie Messer und Scheren sind im Alltag unerlässlich. Auch unser Körper kommt nicht ohne sie aus. Als so genannte Proteasen dienen sie beispielsweise im Zell-Inneren dazu, ausgemusterte Proteine zu zerkleinern und sie so für die Wiederverwertung aufzubereiten. Im Magen-Darm-Trakt zerlegen Proteasen die Eiweißstoffe der Nahrung fein säuberlich in Bruchstücke, die dann vom Darm aufgenommen werden können. Der bestuntersuchte Vertreter solcher Verdauungsenzyme ist das Trypsin.

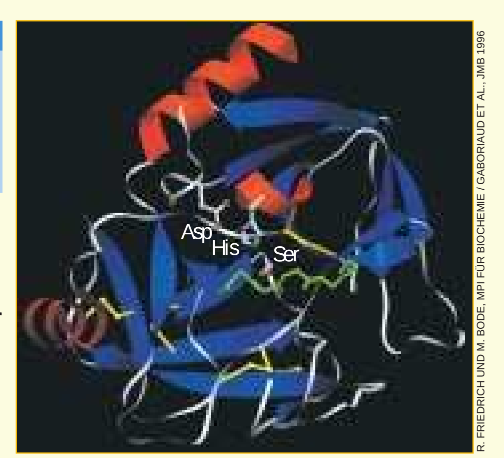
Schneidwerkzeuge sind aber auch gefährlich. Der Mensch verwahrt sie deshalb an einem sicheren Ort. Ebenso sorgt der Körper dafür, dass seine molekularen Scheren nicht versehentlich Schaden anrichten können. So ist die „Klinge" von zellulären Proteasen in einer Fassstruktur untergebracht, zu deren Innerem nur Proteine mit Ausmusterungs-Stempel Zutritt erhalten. Proteasen, die außerhalb der Zelle wirken, tragen dagegen einen kurzen Abschnitt als Sicherung; sie werden erst scharf, wenn eine andere Protease diesen Abschnitt entfernt.

Das gilt auch für Trypsin. Im zugehörigen Gen ist nur ein inaktiver Vorläufer verschlüsselt: das Trypsinogen. Es wird in der Bauchspeicheldrüse hergestellt und gelangt mit den anderen Verdauungssekreten in den Dünndarm. Dort trennt die so genannte Enteropeptidase acht Aminosäuren von dem Molekül ab und wandelt es dadurch in aktives Trypsin um.

Dieses gehört ebenso wie das nahe verwandte Verdauungsenzym Chymotrypsin und das Blutgerinnungsprotein Thrombin zur Familie der Serinproteasen: Als Klinge, mit der das Enzym zum chemischen Schnitt ansetzt, fungiert die Seitenkette der Aminosäure Serin – an sich ein recht harmloser Molekülteil, der gewöhnlichem Alkohol ähnelt. Zum Skalpell machen ihn zwei weitere, genauestens positionierte Aminosäuren. Die eine ist ein Histidin, das kurzfristig das Wasserstoff-Ion des Alkohols übernehmen kann. Bei der anderen handelt es sich um eine Asparaginsäure, die dafür sorgt, dass das Histidin in der für die Übernahme des Wasserstoff-Ions benötigten chemischen Form und Orientierung vorliegt. Gemeinsam werden diese drei Aminosäuren als die „katalytische Triade" bezeichnet.

Steckbrief

- ➤ Molekulargewicht: 24099
- ➤ Aminosäuren: 224
- ➤ eine Domäne
- ➤ proteinspaltendes Enzym
- ➤ Chromosom Nr. 7



R. FRIEDRICH UND M. BODE, MPI FÜR BIOCHEMIE / GABORIAUD ET AL., JMB 1996

Aktives Zentrum von Trypsin ist die „katalytische Triade" aus den Aminosäuren Aspartat, Histidin und Serin. Das Serin zerschneidet Proteine, die in der Bindungstasche des Enzyms sitzen — ein Beispiel ist hier grün dargestellt. Disulfidbrücken (gelb) verknüpfen Schleifen der Aminosäurekette.

Eine der Triade benachbarte Bindungstasche greift sich die Stelle, an der das „Opfer" des Verdauungsenzyms aufgespalten werden soll; beim Trypsin ist das eine Lysin- oder Arginin-Gruppe. Das scharf gemachte Serin attackiert dann die so genannte Peptidbindung, welche die beiden zu trennenden Proteinteile an dieser Stelle zusammenhält.

Dazu bietet es sich zunächst dem einen Teil als Bindungspartner an und spaltet dabei den Rest des Proteins ab — auf dessen Stickstoff-Ende überträgt es via Histidin seinen Alkohol-Wasserstoff. Anschließend löst es sich wieder von der zunächst gepackten Hälfte. Dabei überlässt es dieser die Hydroxid-Gruppe eines aktivierten Wassermoleküls, während es selbst das verbleibende Wasserstoff-Ion übernimmt.

Das Zerschneiden klappt jedoch nicht immer. Viele Proteine sowohl aus tierischen Organen als auch aus Pflanzen (besonders aus Hülsenfrüchten) verstehen sich auf den Trick, die Messerklinge stumpf zu machen, indem sie sich als Scheide darüber stülpen. Die Pflanzen verhindern so, dass das Trypsin die Samen verdaut. Diese können nach der Passage des Magen-Darm-Traktes daher immer noch keimen. Das Tier, das sie gefressen hat, wird dadurch praktisch als Vehikel missbraucht, das zur Verbreitung der Samen beiträgt.

 (Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

ASTROPHYSIK

Gigantischer Strahlungsblitz in Rekorddistanz

Einer internationalen Astronomengruppe gelang es, das Spektrum des optischen Nachleuchtens eines kosmischen Gammastrahlen-Ausbruchs zu messen, der in einer Entfernung von etwa zehn Milliarden Lichtjahren stattfand.

Von Georg Wolschin

Zu den geheimnisvollsten Himmelsphänomenen gehören die Gammablitze. Diese gewaltigen Strahlungsausbrüche in fernen Regionen des Kosmos setzen in zehn Sekunden mehr Energie frei als die Sonne in zehn Milliarden Jahren. Schon 1967 wurden sie zufällig entdeckt: Die Vela-Satelliten zur Überwachung des Kernwaffen-Teststoppabkommens registrierten unerklärliche kurze Pulse von Gammastrahlen – bis 1973 waren es 16; sie stammten ganz offensichtlich nicht von Atombomben-Explosionen, sondern kamen aus allen Richtungen des Weltalls.

Erst Anfang der siebziger Jahre weckten sie die Aufmerksamkeit breiter Forscherkreise. Vor allem mit dem *Burst and Transient Source Experiment* (Batse) an Bord des Compton-Gammastrahlungsobservatoriums konnten in den neunziger Jahren mehrere tausend dieser einmaligen Ereignisse nachgewiesen werden (Spektrum der Wissenschaft 2/94, S. 64). Sie dauerten jeweils nur wenige Sekunden bis Minuten. Durchschnittlich trat eines pro Tag auf. Am 4. Juni 2000 steuerte die Nasa den Compton-Satelliten nach einer höchst umstrittenen Entscheidung jedoch in die Erdatmosphäre und vernichtete ihn. Bis dahin hatte sich die Gammastrahlen-Astronomie allerdings bereits weltweit als neues Gebiet etabliert.

Zunächst vermutete man die Quellen der Hochenergie-Ausbrüche in unserer kosmischen Nachbarschaft, der Milchstraße; es schien einfach nicht vorstellbar, dass ein Ereignis in den fernen Tiefen des Alls so viel Energie freisetzen könne, dass noch derart große Strahlungsmengen bis zu uns gelangen. Die Verschmelzung von Neutronensternen galt als beliebte Erklärung.

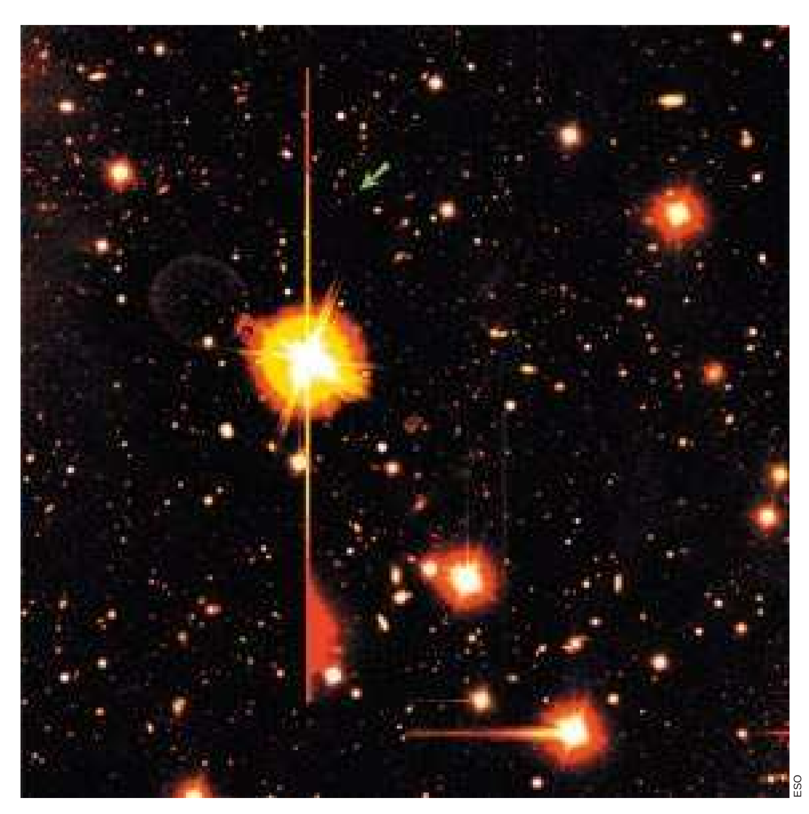
Wie die Untersuchungen mit dem Compton-Satelliten ergaben, sind *Gamma Ray Bursters* (GRBs) jedoch homogen am Himmel verteilt und nicht auf die Ebene der Milchstraße konzentriert. Das zwang zu dem Schluss, dass die Blitze entweder aus einem kugelförmigen Halo um die Galaxis kommen müssen – oder eben doch aus den Tiefen des Alls, also aus Entfernungen von Millionen oder Milliarden von Lichtjahren.

Bei solchen enormen Distanzen sollten sich relativistische Effekte wie die Rotverschiebung von Licht (und natürlich auch von Gammastrahlung) bemerkbar machen, welche die Helligkeitsver- ▶

teilung der GRBs in charakteristischer Weise beeinflussen. Dass diese Effekte mit Batse beobachtet werden konnten sprach dafür, dass die Gammablitze nicht auf die Milchstraße beschränkt sind.

Auch andere Beobachtungen stützten diese Vermutung. So sind starke Ausbrüche – die im Mittel näher bei uns liegen sollten – durchschnittlich kürzer als schwache, weiter entfernte. Dies lässt sich mit der wachsenden Zeitdehnung erklären, die sich für zunehmende Entfernungen wegen der größeren Expansionsgeschwindigkeiten aus der speziellen Relativitätstheorie ergibt.

Dennoch war auf diese Weise der Ursprung der GRBs nicht wirklich zweifelsfrei zu klären. Um eindeutig zu beweisen, dass sie von außerhalb der Milchstraße stammen, musste man Gegenstücke in anderen Spektralregionen finden – beispielsweise ein Nachleuchten im optischen Bereich oder eine lichtschwache entfernte „Wirts-“Galaxie, aus welcher der Gammablitz offensichtlich stammt. Anhand der Rotverschiebungen wohlbekannter Spektrallinien lassen sich dann die Entfernungen bestimmen.



ESO

Nur als schwacher Punkt (grüner Pfeil) erscheint das optische Gegenstück zum Gamma-Strahlungsausbruch GRB 000131 auf diesem Bild, das aus mehreren Aufnahmen des Very Large Telescope der europäischen Südsternwarte Eso zusammengesetzt wurde.

Ein optisches Gegenstück aufzuspüren gelang erstmals 1997 mit dem Italienisch-Niederländischen Satelliten BeppoSAX. Er konnte GRBs mit einer Genauigkeit von sechs Bogensekunden (knapp einem Drittel des Monddurchmessers) innerhalb weniger Stunden lokalisieren – schnell und präzise genug, um mit optischen und Radioteleskopen nach Emissionen aus der fraglichen Region zu suchen. Als BeppoSAX einen Gammablitz im Sternbild Orion entdeckte, wurde schon 21 Stunden später mit dem 4,2-Meter-William-Herschel-Teleskop auf La Palma die entsprechende Himmelsregion im sichtbaren Spektralbereich genau inspiziert – kurz darauf auch mit dem NTT-Teleskop der europäischen Südsternwarte Eso in La Silla (Chile), dem Keck-Teleskop auf Hawaii und dem Hubble-Weltraumteleskop. All diese Beobachtungen lieferten übereinstimmende Hinweise, dass der Burst aus einer weit entfernten Galaxie kam (Spektrum der Wissenschaft 9/97, S. 30).

Nur wenig später gelang es mit dem 36-inch-Teleskop des Kitt-Peak-Observatoriums, das Spektrum des schwach leuchtenden optischen Gegenstücks eines Gammabursts aufzunehmen und dabei auch die Rotverschiebung zu bestimmen. Der gemessene Wert von 0,83 war viel zu groß für eine galaktische Quelle. Ein extragalaktischer Ursprung ließ sich seither für zahlreiche Gammabursts beweisen: Bei etwa zwanzig Ausbrüchen bisher konnte man das optische Gegenstück identifizieren und bei zwölf von ihnen die Rotverschiebung und damit die Entfernung bestimmen.

Das optische Nachleuchten der Blitze verrät ihre Distanz

Eine weitere aufschlussreiche Entdeckung gelang einer italienischen Astronomengruppe im Mai vergangenen Jahres. Die Forscher schafften es, mit einem Polarimeter am 8,2-Meter-Antu-Teleskop des Very Large Telescope (VLT) der Eso auf dem Cerro Paranál (Chile) 18 Stunden nach einem Gammaburst die Polarisation der Strahlung beim optischen „Nachleuchten“ zu bestimmen. Es war die genaueste Polarisationsmessung, die jemals bei einem derart lichtschwachen Objekt gemacht wurde.

Das Ergebnis gibt einen interessanten Hinweis auf den Mechanismus der Energie-Erzeugung beim optischen Nachleuchten. Aus der gemessenen linearen Polarisation des Lichts lässt sich nämlich schließen, dass es sich um Synchrotronstrahlung handelt, wie sie Elektronen auf Spiralbahnen in einem Magnetfeld aussenden.

Doch auch derart verfeinerte Beobachtungsergebnisse haben das grundlegende Rätsel bisher nicht lösen können, wie Gammablitze zu Stande kommen. Selbst wenn man sehr exotische Szenarien wie kollabierende extrem massereiche Sterne oder verschmelzende Schwarze Löcher konstruiert, hat man Probleme, die enorme Energie-Abgabe zu erklären. Einen vagen Anhaltspunkt für den Entstehungsmechanismus der Ausbrüche liefern lediglich Befunde, wonach die Bursts anscheinend bevorzugt in den Sternentstehungsgebieten entfernter Galaxien auftreten.

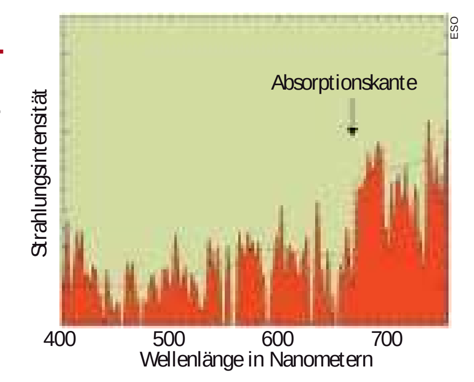
Ende letzten Jahres wurde schließlich der bisher bei weitem fernste Gammaburst entdeckt; er erhielt die Bezeichnung GRB 000131. Seine Rotverschiebung von 4,50 entspricht einer Distanz von etwa zehn Milliarden Lichtjahren. Die Galaxie, in der das Ereignis stattfand, leuchtet deshalb so schwach, dass sie im optischen Bereich zuvor nicht sichtbar war.

Den Burst registrierte ein Satellitennetzwerk; aus den unterschiedlichen Ankunftszeiten bei den verschiedenen Satelliten ließ sich die Quelle durch Triangulation auf eine etwa fünfzig Bogenminuten zum Quadrat große Himmelsregion eingrenzen. 84 Stunden nach dem Ausbruch wurde das Objekt auch im optischen Bereich mit dem VLT registriert. Beobachtungen des Nachleuchtens mit zwei Teleskopen in La Silla und mit dem VLT zeigten rotes Licht ohne blaue und ▶

grüne Anteile und deuteten bereits auf eine sehr große Rotverschiebung hin; sie ließ sich in einer dreistündigen Messung mit dem Spektrometer FORS1 am Teleskop Antu des VLT schließlich genau bestimmen (Bild).

Entscheidendes Merkmal war dabei ein markanter Intensitätsabfall im Spektrum bei Wellenlängen unter etwa 670 Nanometern. Er rührt daher, dass Wasserstoffwolken an verschiedenen Stellen der Sichtlinie alles kurzwelligere Licht absorbieren. Die Wasserstoffatome gehen dabei jeweils aus dem Grundzustand in den ersten angeregten Zustand über. Die Wellenlänge, bei der dies geschieht, hängt vom Abstand der jeweiligen Wolke ab. Je weiter sie entfernt ist, desto stärker ins Rote ist die Absorptionslinie verschoben. Man findet also eine fast kontinuierliche Serie von solchen Linien zwischen der Wellenlänge, bei der die Absorption in einem irdischen Labor stattfindet, und derjenigen, bei der sie in der letzten Wolke unmittelbar vor dem Objekt auftritt, dessen Licht registriert wurde.

Im Labor liegt die so genannte Lyman-Alpha-Linie, von der hier die Rede ist, im ultravioletten Bereich bei 121,6 Nanometern. Der Intensitätsabfall, der die Position der letzten Wolke vor dem Burster anzeigt, befindet sich dagegen bei 668,8 Nanometern im langwelligen sichtbaren Bereich. Daraus errechnet sich die erwähnte Rotverschiebung von 4,50 für das Nachleuchten des Gammabursts.



Das Spektrum des optischen Gegenstücks zum Gammaburst GRB 000131 hat eine Absorptionskante bei 670 Nanometern. Die daraus bestimmte Rotverschiebung von 4,50 zeigt, dass der Ausbruch in etwa zehn Milliarden Lichtjahren Entfernung stattfand. Er ist damit das bei weitem fernste Ereignis dieser Art, das man kennt.

Die beim Ausbruch allein in Form von Gammastrahlen freigesetzte Energie betrug etwa 10^{54} erg. Das entspricht der Energiemenge, welche die Sonne in acht Billionen Jahren in allen Spektralbereichen abstrahlen würde (wenn sie nicht in rund fünf Milliarden Jahren bereits verglühen würde). In diesem Jahr setzen die Gamma-Astronomen nun ihren ganzen Ehrgeiz daran, auch die Wirtsgalaxie zu identifizieren und ihre Eigenschaften so genau wie möglich zu untersuchen.

Wegen der Rekorddistanz dieses Gammabursters stammt die von ihm ausgesandte Strahlung aus einer Zeit, als das All erst etwa ein Zehntel so alt war wie heute. Die Untersuchung derart ferner Ausbrüche hochenergetischer Strahlung dürfte sich deshalb hervorragend dazu eignen, den frühen Kosmos zu erforschen – insbesondere die Vorgänge, die damals bei der Sternentstehung abliefen.

Der am 2. Oktober letzten Jahres gestartete Satellit Hete-2 (High Energy Transient Explorer 2) wird wesentlich dazu beitragen, die Zeitspanne zwischen der Entdeckung eines Gammabursts und dem Aufspüren seines optischen Gegenstücks zu verkürzen. Er misst Röntgen- und Gammastrahlung im Energiebereich von 0,5 bis über 400 Kiloelektronenvolt und ermöglicht die ziemlich genaue Lokalisierung eines Gammabursts; das Ergebnis wird bereits 10 bis 20 Sekunden nach der Entdeckung an die terrestrischen Observatorien weitergeleitet. Sie können dann sofort beginnen, nach optischem Gegenstück, Nachleuchten und Wirtsgalaxie zu fahnden. Trotz allem werden sie freilich nur in der Minderheit der Fälle Erfolg haben: Aus unbekannten Gründen bleiben 60 Prozent der Bursts im sichtbaren Spektralbereich dunkel und haben auch kein optisches Nachleuchten. ■

Dr. habil. Georg Wolschin *ist Theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

PALÄOANTHROPOLOGIE

Hat die Menschheit doch mehrere Wurzeln?

Neue anatomische Untersuchungen sprechen dafür, dass es in Australien und Europa eigenständige Entwicklungslinien zum *Homo sapiens sapiens* gegeben hat.

Von Henning Engeln

Entstand der moderne Mensch vor rund 200 000 Jahren in Afrika, breitete sich vor 100 000 Jahren innerhalb weniger zehntausend Jahre über die Erde aus und verdrängte alle älteren Populationen vollständig? Oder entwickelten sich alteingesessene Menschheitsgruppen in ihren Regionen weiter zum heutigen *Homo sapiens*, wobei sie sich mit neueren Populationen vermischt haben könnten, die aus Afrika einwanderten? Diese Frage spaltet die Anthropologen seit langem in zwei unversöhnliche Lager. In den letzten Jahren hatten die Verfechter des „Out-of-Africa“-Modells die Nase vorn. So legen DNA-Untersuchungen an Neandertaler-Knochen nahe, dass diese Menschheitsform sich schon vor mehr als 500 000 Jahren abgespalten hat und daher nicht in unsere direkte Ahnengalerie gehört. Auch spricht das sehr frühe Auftreten von anatomisch modernen Menschen in Afrika für die Vermutung, dass die direkten Vorfahren der heutigen Menschen sich nur auf diesem Kontinent und nicht parallel in anderen Regionen entwickelt haben. Dieser Auffassung ist jedenfalls Günter Bräuer vom Institut für Humanbiologie der Universität Hamburg.

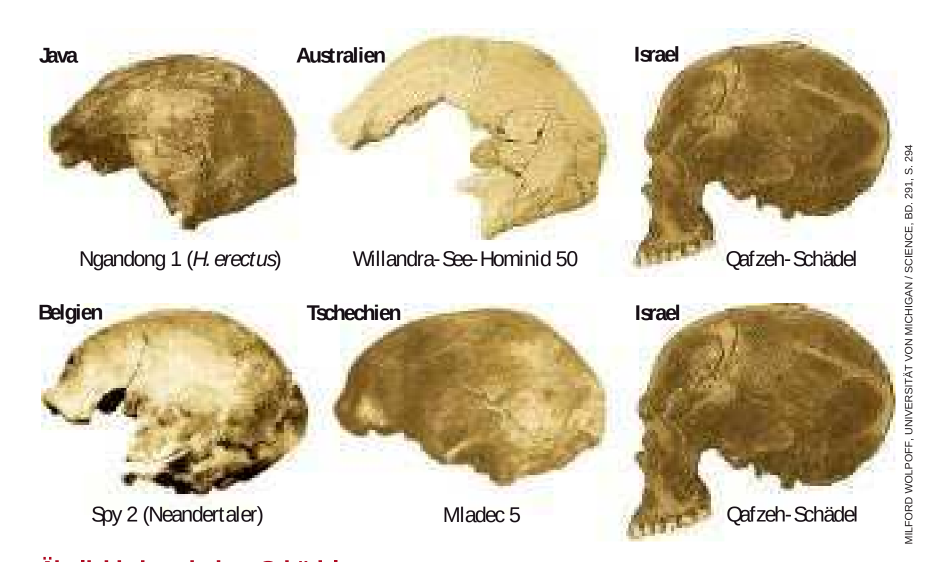
Doch dank neuer Arbeiten können die Befürworter einer multiregionalen Entstehung jetzt wieder Punkte für sich verbuchen. Wissenschaftler um den Anthropologen Milford Wolpoff von der Universität von Michigan in Ann Arbor haben Merkmale an 13 000 bis 30 000 Jahre alten Schädeln von modernen Menschen analysiert, die teils aus Mladec in Tschechien und teils von den australischen Willandra-Seen stammen, und sie mit älteren Schädeln aus diesen Regionen sowie mit jüngeren aus dem Nahen Osten und Afrika verglichen. Ihre Idee: Wenn die Out-of-Africa-Hypothese stimmt, müssten die Funde von Mladec und den Willandra-Seen größere Ähn- ▶

lichkeiten mit den modernen *Homo-sapiens*-Schädeln aus dem Nahen Osten und Afrika aufweisen als mit ihren Vorgängern vor Ort – falls nicht, spräche das für eine regionale Weiterentwicklung zu den modernen Kopfformen.

Die Anthropologen untersuchten die beiden am besten erhaltenen fossilen Schädel aus Tschechien – Mladec 5 und Mladec 6 – sowie den auf 13 000 bis 15 000 Jahre datierten australischen Fund WLH 50 (Willandra Lakes Hominid 50). Zum Vergleich dienten typische Neandertaler aus Europa wie die von La Chapelle oder dem belgischen Spy; als Referenz für den australischen Schädel wurden – in Ermangelung älterer Exemplare auf dem Kontinent selbst – Funde aus Ngandong auf Java herangezogen, die als archaische Vertreter des *Homo sapiens* oder sogar späte Überlebende des *Homo erectus* gelten. Als Vertreter jüngerer, moderner Menschen wählten die Wissenschaftler Fossilien von Fundorten im Nahen Osten wie Qafzeh und Skhul sowie solche aus Afrika, zum Beispiel aus Omo oder Laetoli.

Wolpoff und seine Mitarbeiter registrierten das Vorhandensein oder Fehlen von bis zu dreißig Merkmalen – je nachdem wie vollständig die Schädel erhalten waren – und leiteten daraus statistische Verwandtschaftsbeziehungen ab.

Das Ergebnis war bemerkenswert. Im Durchschnitt unterschied sich der australische Schädel von den Ngandong-Exemplaren in nur 3,7 Merkmalen, von jenen aus dem Nahen Osten dagegen in 7,3 und von den afrikanischen sogar in 9,3 Charakteristika. Demnach ist WLH 50 eindeutig näher mit den regionalen Vorfahren in Asien verwandt als mit den späteren modernen Hominiden.



Ähnlichkeit zwischen Schädeln: **Für Australien/Asien (obere Reihe) und Europa (untere Reihe) verglichen Anthropologen jeweils einen jungen *Homo-sapiens*-Schädel (Mitte) in bis zu dreißig Merkmalen mit einem lokalen archaischen Typ (links) einerseits und mit einem Vertreter des modernen *Homo sapiens sapiens* afrikanischen Ursprungs im Nahen Osten (rechts) andererseits. Die Ähnlichkeit zu den urtümlichen Typen war dabei stets mindestens so groß wie die mit dem modernen *Homo*-Vertreter. Demnach entstand der heutige Mensch in Europa und Australien durch Vermischung der archaischen Urbevölkerung mit Einwanderern aus Afrika.**

Haben sich Adam und Eva gar nicht gekannt?

Die Auswertung der Schädel aus Tschechien lieferte kein so klares Bild. Mladec 5 ist mit 14,8 Unterschieden gegenüber den Neandertalern von diesen etwa genauso weit entfernt wie von den Funden aus dem Nahen Osten (14,0 Differenzen). Mladec 6 hingegen offenbart mit nur 7,8 Differenzen wiederum eine größere Nähe zu den Neandertalern als zu den modernen *Homo-sapiens*-Formen im Vorderen Orient (11,6 Differenzen). Für Wolpoff ist damit erwiesen, dass die heutige Menschheit nicht allein von einer kleinen, vor rund 100 000 Jahren aus Afrika ausgewanderten Gruppe des *Homo sapiens* abstammen kann.

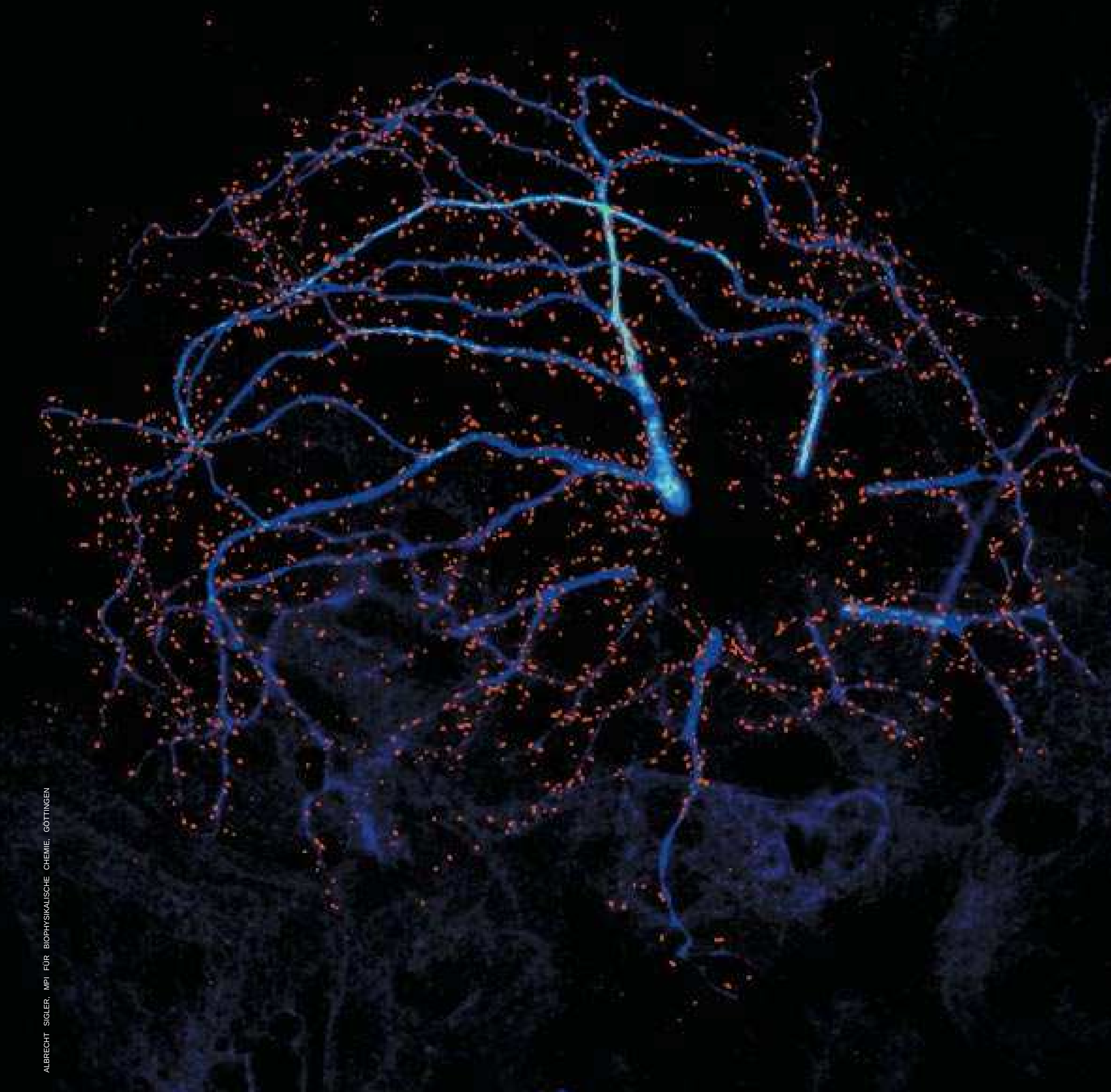
Auch die Ergebnisse einer neueren DNA-Untersuchung sind schlecht mit der reinen „Out-of-Africa"-Hypothese vereinbar. Wissenschaftler um Gregory J. Adcock von der Universität Pierre und Marie Curie in Paris sowie Alan Thorne von der Australischen National-Universität in Canberra analysierten die Erbsubstanz von zehn Fossilien moderner Menschen aus Australien und verglichen sie mit der von lebenden Menschen, europäischen Neandertalern, Schimpansen und Bonobos. Während neun australische Funde im Alter zwischen 8000 und 15 000 Jahren gut in den Schwankungsbereich der heutigen Menschen passten, fiel ein Fund heraus: Die DNA des „Mungo Man", der bereits 1974 am Mungo-See im Südosten Australiens gefunden worden war und nach einer Neudatierung auf ein Alter von 60 000 Jahren geschätzt wird, unterscheidet sich stärker von den heute lebenden Menschen als das Erbgut der untersuchten Neandertaler. Anatomisch hingegen gehört der Mungo Man zum modernen *Homo sapiens sapiens*.

Wolpoff hält die genetischen Analysen deshalb grundsätzlich für fragwürdig. Er glaubt, dass sie ganz verschiedene Ergebnisse liefern können, je nachdem welche Abschnitte des Genoms man betrachtet. Für Analysen von weiblichen Abstammungslinien dient in der Regel DNA aus den Mitochondrien – Energie liefernden Strukturen außerhalb des Zellkerns, die direkt von der Mutter auf die Tochter weitervererbt werden. Analog wird zur Suche nach dem männlichen Urahn gewöhnlich das Y-Chromosom herangezogen, das Väter unverändert an ihre Söhne weitergeben. Wie sich unlängst herausstellte, stimmen die Ergebnisse der beiden Analysen aber nicht überein. So berichtete Peter Underhill von der Universität Stanford im vergangenen Jahr, dass Untersuchungen am menschlichen Y-Chromosom zufolge der letzte gemeinsame Vorfahr aller Männer vor 59 000 Jahren durch die afrikanischen Savannen zog. Dagegen deuten die genetischen Spuren der Mitochondrien auf eine Urmutter aller heutigen Menschen hin, die bereits vor 143 000 Jahren lebte. Demnach hätten sich – paradoxe Situation – Adam und Eva gar nicht gekannt. Tatsächlich erklärt sich die Diskrepanz wohl damit, dass die Evolutionsgeschichte einzelner Teile des menschlichen Erbguts unterschiedlich verlaufen ist.

Nimmt man hinzu, dass auch die Kalibrierung der molekularen Uhr – die ja eine konstante Mutationsrate sowohl über die Zeit als auch für die verschiedenen Gene voraussetzt – umstritten ist, so bleibt das Gesamtbild verworren. Erst umfangreichere DNA-Analysen sowie mögliche weitere Fossilfunde können die Ausbreitungsgeschichte des modernen Menschen eindeutig klären – und den Streit darüber beilegen, ob unser aller Vorfahren erst kürzlich aus Afrika auswanderten oder ob nicht doch auch ältere Gene in uns schlummern. ■

***Henning Engeln** ist promovierter Biologe und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.*

Leuchtende Nervenkontakte



ALBRECHT SIGLER, MPI FÜR BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE, GÖTTINGEN

Nervenzellen können über Tausende von so genannten Synapsen Signale untereinander austauschen. Das geschieht mittels chemischer Botenstoffe, die an solchen Kontaktstellen ausgeschüttet werden. Forscher im Arbeitskreis von Christian Rosenmund am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen haben mit zwei verschiedenen Fluoreszenzmarkern sämtliche Synapsen (rot) und die größeren dendritischen Fortsätze (blau) einer einzigen Nervenzelle aus dem Großhirn einer Maus sichtbar gemacht. Mit solchen Markern lassen sich auch die aktiven Synapsen anfärben, die bei einer Stimulation Botenstoffe – so genannte Neurotransmitter – freisetzen. Der Vergleich ermöglicht Aussagen über die Signalverarbeitung in den betreffenden Nervenzellen. So konnten die Göttinger Forscher Proteinen mit bislang unbekannter Funktion eine Rolle bei der Neurotransmitter-Ausschüttung zuordnen.

Science and Fun

Spektrum DER WISSENSCHAFT



DREIFACH-TORUS

Diese drei Tori in verschiedenen Größen bieten viel. Aus schraubenförmig gedrehten Metallbändern gewickelt, können sie einander durchdringen – und auseinander hervorspringen. Ein ergiebiges Spielzeug für Erwachsenenfinger; **DM 99,–.**

LORIOT-ARMBANDUHR

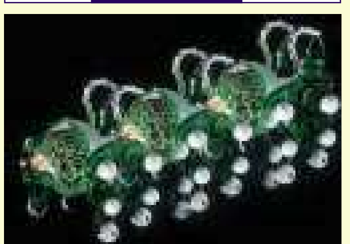
Schwarzes Lederarmband mit geprägter Loriot-Signatur, Edelstahlgehäuse, wasserdicht bis 3 atm, 1 Jahr Garantie; **DM 160,–**.



PUZZLES

Eruption (1), Kristall (2), Tiefenrausch (3), Format 49,7 × 69,7 cm, je 1000 Teile. Exklusiv von Ravensburger gefertigt; je **DM 39,80**.

AVOIDER III



Das mechanische „Haustier" Avoider braucht kein Futter. Sie müssen es nur zusammenbauen und für seine Bewegungsfreiheit sorgen. Es ist mit einem Lichtsensor ausgestattet und umläuft mit seinen sechs Beinen geschickt alle Hindernisse, die sich ihm in den Weg stellen. Maße zusammengebauter Roboter 11x14x14 cm. Für den Zusammenbau ist ein Lötkolben erforderlich. **DM 132,–.**



T-SHIRT „AUGE"

100 Prozent Baumwolle, Größe XL, **DM 29,–**.

FUNK-THERMOMETER

Das Design-Thermometer misst nicht nur die Raumtemperatur. Es wird komplett mit Batterien und einem Sensor für die Außentemperatur geliefert. Die integrierte Funkuhr zeigt Ihnen immer die genaue Uhrzeit an; **DM 94,–**.



JUNIOR WISSEN

ZICKE ZACKE

Bei der Hühnerolympiade steht die Disziplin Federklau auf dem Programm. Dabei versuchen die 2 - 4 mitspielenden „Hühner", sich gegenseitig zu überholen. Aber nur, wer sich auf dem Hühnerhof auskennt, kommt gut voran. Das Spiel für kleine Kinder ab 4 Jahren trainiert das Gedächtnis. Spieldauer: 10 - 15 Minuten; **DM 59,–.**

KACHELMANNS WETTERSTATION



Jörg Kachelmann lässt in seiner Wetterstation nicht nur die Geheimnisse eines Gewitters aufblitzen, sondern zeigt auch, wie Hurrikans entstehen oder wie der Körper auf verschiedene Wetterlagen reagiert. Inhalt: 2 Präzisionsthermometer (-30 bis +50 °C), Regenmesser, Windgeschwindigkeitsmesser, Wetterhaus und andere Teile; **DM 198,–**.

SOLAR-BOX 77

Mit den 460 Einzelteilen des Baukastens (inkl. farbiger Bauanleitung) können verschiedene Modelle wie Kettenkarussel, Fahrradfahrer, Windmühle und Flugzeug gebaut werden. Die Box enthält eine 1,5 Volt Solarzelle mit Motor. Empfohlen ab 8 Jahren; **DM 130,–**.




INFORMATIONS- UND BESTELLSERVICE →

PALÄONTOLOGIE

Jurassic Park in Argentinien

Der argentinische Farmer staunte nicht schlecht, als er auf dem trockenen Hochplateau Patagoniens eine riesige Wirbelsäule entdeckte, die mit dem Fels verschmolzen war. Wie die zu Rate gezogenen Forscher um Gerardo Cladera vom Egidio-Feruglio-Paläontologie-Museum in Trelew feststellten, gehörte sie zu einem etwa 150 Millionen Jahre alten, bisher unbekannten Dinosaurier. Bei der weiteren Erkundung der Gegend fand das Expertenteam einen regelrechten versteinerten Zoo voller Raritäten oder bisher unbekannter Arten. Bis zu zehn Meter lange pflanzenfressende Dinosaurier waren ebenso vertreten wie große räuberische Theropoden aus der Verwandtschaft von *Tyrannosaurus rex*. Zu Tage kam auch das älteste bisher bekannte Säugetier (das so klein ist wie eine Ratte) sowie eine urtümliche Seeschildkröte. „Skelette aus dem Jura sind sehr, sehr selten", meint Cladera. „Wir wissen kaum etwas über die Evolution von Dinosauriern, Flugsauriern und Säugetieren aus dieser Epoche." Eines der Skelette scheint sogar vollständig erhalten zu sein. Seit März werden die Fossilien ausgegraben, klassifiziert und benannt.

AP



Versteinerte Wirbelsäule eines bisher unbekannten Dinosauriers

PFLANZENPHYSIOLOGIE

Bitte streichle mich (nicht)

Viele Pflanzenfreunde behaupten, ihre Lieblinge würden besser gedeihen, wenn sie mit ihnen reden. Während dies nach wie vor umstritten ist, wurde jetzt wissenschaftlich belegt, dass es manchen Wildkräutern gut tut, wenn sie zweimal pro Woche gestreichelt werden. Andere Arten nehmen das Tätscheln allerdings übel: Sie werden vermehrt von Insekten befallen oder gehen sogar ganz ein. James Cahill von der Universität von Delaware in Newark sowie Jeff Castelli und Brenda Casper von der Universität von Pennsylvania in Philadelphia hatten bei ihren feldökologischen Untersuchungen einer Bergwiese beobachtet, dass die von ihnen markierten Pflanzen mehr Fraßspuren zeigten als die in Ruhe gelassenen. In einem neuen Experiment simulierten sie deshalb die bei ihren Messungen üblichen Berührungen und verglichen die Folgen für verschiedene Pflanzen – mit erstaunlichem Resultat: Während Blutwurz und Leinkraut beispielsweise von den Streicheleinheiten profitierten, bekam die Zuwendung dem Indianerhanf weniger gut; er litt anschließend unter verstärktem Insektenbefall. Die Forscher vermuten, dass sich durch die Berührungen die Blattstruktur ändert oder dass die Pflanzen leichtflüchtige Substanzen abgeben, die Insekten anlocken bzw. abwehren. Die Beobachtung ist für Feldökologen etwas Ähnliches wie die Heisenbergsche Unschärferelation für Physiker: Beide besagen, dass der Akt der Beobachtung das beobachtete Objekt beeinflusst – aber nicht wie. *(Ecology 82(2), S. 307)*

J.C. CAHILL



Gestreichelter Indianerhanf schmeckt der Raupe besser.

ASTRONOMIE

Ein kosmisches Insekt

Sterbende Sterne blähen sich zu Roten Riesen auf und stoßen ihre äußeren Schichten ab. So entstehen gigantische Gaswolken. Am Ende des 18. Jahrhunderts sah sie der Astronom Friedrich Wilhelm Herschel als runde Nebelflecken, ähnlich den Planetenscheiben, und nannte sie daher planetarische Nebel. Er hätte wohl eine andere Bezeichnung gewählt, würde er Menzel 3 kennen. Dieser planetarische Nebel liegt 3000 Lichtjahre entfernt in der Milchstraße des südlichen Himmels und hat die Gestalt einer 1,6 Lichtjahre langen Ameise. Jetzt zeigen Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops das kosmische Insekt in atemberaubender Detailfülle. Der Zentralstern befindet sich genau in der Taille zwischen zwei blasigen Gaswolken. Die eine erinnert an den überdimensionalen Kopf, die andere an Brust und Hinterleib einer Ameise. Von beiden Wolken weisen unzählige Filamente wie Insektenbeine und Fühler weg. Für die bizarre Nebelgestalt gibt es zwei Erklärungen. Der Zentralstern könnte einen noch unentdeckten Begleiter haben, dessen Gravitation die Gaswolken formt. Oder der Stern stirbt einsam, und wir sehen das Abbild seines komplexen Magnetfeldes, weil geladene Teilchen, die er mit 1000 Kilometern pro Sekunde ins All schießt, den Feldlinien folgen. Durch das UV-Licht des Sterns oder den Zusammenprall mit anderen Partikeln würden sie zum Leuchten angeregt.



NASA, ESA AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM



Planetarischer Nebel in Ameisengestalt

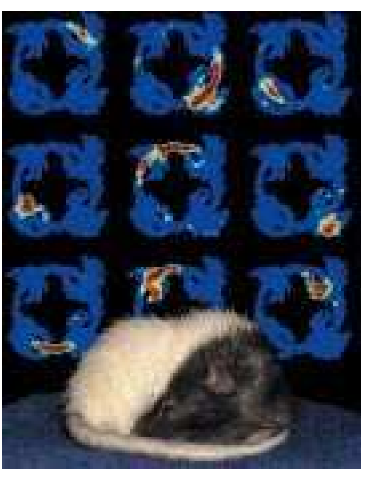
TEILCHENPHYSIK

Wankt das Standardmodell?

Myonen sind die schweren Verwandten der Elektronen. Wie diese haben sie als elektrisch geladene Teilchen mit Spin ein magnetisches Moment. Sie verhalten sich also wie winzige Stabmagneten. Zudem ist es Elementarteilchen nach der Heisenbergschen Unschärferelation gestattet, andere Partikel auszusenden und gleich wieder einzufangen. Die nicht beobachtbaren Teilchen tragen ebenfalls zum magnetischen Moment bei. Und über diesen Beitrag macht das seit mehr als 30 Jahren bewährte Standardmodell der Teilchenphysik genaue und überprüfbare Aussagen. Nun haben 68 Wissenschaftler aus den USA, Russland, Japan und Deutschland das Ergebnis dreijähriger Experimente präsentiert, in denen sie das magnetische Moment der Myonen so exakt wie nie zuvor bestimmten. Am Brookhaven National Laboratory ließen sie Myonen in einem Ringmagneten mit nahezu Lichtgeschwindigkeit kreisen. Aus der Spinänderung, welche die Teilchen dabei erfuhren, ermittelten die Forscher das magnetische Moment. Mit bemerkenswertem Resultat: Der gefundene Wert liegt deutlich über dem, den das Standardmodell vorhersagt. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Daten doch mit dem Modell übereinstimmen, beträgt nur ein Prozent. Ist das etablierte Gedankengebäude der Teilchenphysik also reif für den Abriss? So weit möchten die Forscher denn doch nicht gehen. Aber das Ergebnis einer weiteren Datenauswertung, das binnen Jahresfrist vorliegen soll, wird schon jetzt mit Spannung erwartet.

NEUROLOGIE

Wovon Ratten träumen



K. LOUIE, MIT

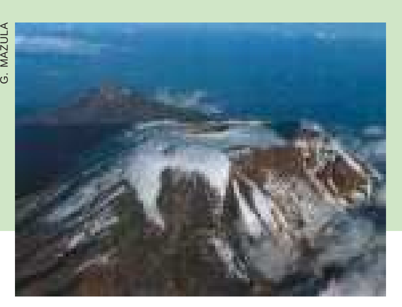
Schlafende Ratte und ihre Hirnaktivität beim Rennen

Auch Ratten kennen verschiedene Schlafstadien. Doch wovon träumen die Tiere? Da sie nicht gefragt werden können, haben Matthew Wilson und seine Mitarbeiter vom Massachusetts Institute of Technology die Hirnaktivitäten der Nager bei der Futtersuche in einem Labyrinth und während des Schlafs aufgezeichnet. Der Vergleich ergab, dass bei der Hälfte der Tiere die Nervenzellen einer speziellen Hirnregion im REM-Schlaf mit einem ähnlichen Muster feuerten wie während der Aktivität. Der Zusammenhang war so eindeutig, dass man sogar darauf schließen konnte, von welchem Teil des Labyrinths ein Tier gerade träumte und ob es dabei „rannte“ oder „stand“. „Wenn wir den Inhalt der Träume kennen“, erklärt Wilson, „können wir vielleicht herausfinden, warum einige Ereignisse im Schlaf wiederholt werden und andere nicht“. Das Ergebnis wirft auch erneut die Frage auf, ob und wie Tiere denken. Bisher wurde nur sehr wenigen – etwa Schimpansen und Delfinen – zugestanden, Erlebnisse detailliert erinnern und bewerten zu können. *(Neuron 29 (1), S. 145)*

KLIMATOLOGIE

Kein Schnee am Kilimandscharo

Wenn sich das Weltklima weiterhin so erwärmt wie bisher, wird der Kilimandscharo in 15 Jahren eisfrei sein. Seit 1912 sind bereits über 80 Prozent des Gletscherfeldes auf seinem Gipfel weggeschmolzen, davon mindestens ein Drittel im Laufe des vergangenen Jahrzehnts. Lonnie Thompson von der Ohio State University in Columbus hat in den vergangenen 20 Jahren die empfindlichen Eiskappen der tropischen Berge aller drei Kontinente untersucht und dabei einen generellen Rückgang festgestellt. Die Konsequenzen sind nicht nur für die Tourismusindustrie fatal: Die Eismassen auf den Berggipfeln wirken wie natürliche Wasserspeicher, die während der Regenzeit Schnee sammeln und in der heißen Trockenzeit die Flüsse mit Wasser füllen. Außerdem birgt der Eisblock auf dem Kilimandscharo Informationen über die Klimageschichte Afrikas. Thompson und sein Team haben im vergangenen Jahr deshalb schnell noch Proben genommen – bevor das vermutlich elftausend Jahre alte Archiv sich endgültig in Wasser auflöst.

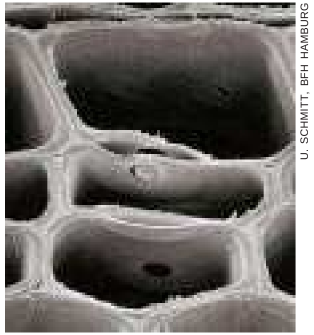


G. MAZULA

Ist der Kilimandscharo bald eisfrei?

BOTANIK

Tote Zellen biologisch gesteuert



U. SCHMITT, BFH HAMBURG

Wasserleitgewebe einer Kiefer

Bei Pflanzen sorgt ein besonderes Gewebe, das Xylem, für die Wasserleitung vom Boden zu den Blättern. Es besteht aus toten Zellen, die miteinander durch winzige Poren, die Tüpfel, verbunden sind. Dort bestimmen Druckgefälle und Leitungswiderstand den Wasserstrom. Bei Trockenstress reißen die Wasserfäden und Gasbläschen entstehen. Die Folge: eine gefährliche Zunahme des Widerstands, die sich selbst verstärkt. All dies sind physikalische Prozesse. Und so hielt man das Xylem bislang für eine physikalische Enklave, der biologischen Kontrolle entzogen. Botaniker um Michele Holbrook von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) bringen die Lehrmeinung jetzt ins Wanken. Bei Durchflussexperimenten an Zweigstücken von 27 Pflanzenarten fanden sie, dass sich der Widerstand des Xylems bis auf 40 Prozent vermindert, wenn dem Wasser Kalium-Ionen zugefügt werden. Das Kalium greift offenbar an den Membranen der Tüpfel an, deren Quellungszustand und Porenweite es verändert. Auf diese Weise könnten Pflanzen dem Leitungsverlust bei Trockenstress entgegenwirken. Ein reger Kalium-Austausch zwischen dem toten Xylem und lebenden Nachbargeweben belegt, dass sie diese Möglichkeit tatsächlich nutzen. *(Sciencexpress 25. 1. 2001)*

MENSCHENAFFEN

Die Kultur der Schimpansen

Die Menschenaffen verblüffen immer wieder mit unerwarteten geistigen Leistungen. In letzter Zeit erregten die Schimpansen mit tradiertem Verhalten Aufsehen. Jede ihrer Populationen pflegt anscheinend eigene Gewohnheiten. Gleichen diese den Wurzeln menschlicher Kulturen?

Von Andrew Whiten und Christophe Boesch

Die Szene spielt in Westafrika im Taï-Regenwaldgebiet, einem der letzten Urwälder des Staates Elfenbeinküste. Auf einer kleinen Lichtung ist eine Gruppe emsig beschäftigt. Unregelmäßiges Klopfen wie von Hammerschlägen ertönt, dazu immer wieder ein Knacken und Krachen. Auf einer harten Unterlage werden hier mit Hämmern kleine, steinharte Nüsse zerschlagen. Doch diese Arbeit verrichten nicht etwa Menschen, sondern – Schimpansen.

Die Gruppe, die hier Mahlzeit hält, besteht aus mehreren erwachsenen Tieren, einigen Jugendlichen und auch ein paar Kindern. Die Erwachsenen knacken die leckeren, walnussähnlichen „Coula"-Nüsse am geschicktesten. Als „Amboss" dienen flache, breite Wurzeln, als „Hammer" Holzstücke. Wenn einer der Affen eine Portion Nüsse vertilgt hat, sammelt er im Umkreis wieder ein paar Hand voll der nahrhaften Früchte zusammen, den Hammer immer bei sich.

Die Jugendlichen beherrschen den Trick noch nicht so gut. Sie probieren immer wieder, ob sie mit einem anderen Hammer nicht besser zu Rande kommen. Und die Kleinsten der Gruppe, die gerade nicht herumtollen, hocken bei der Mutter und ergattern Brocken von zertrümmerten Nüssen.

Würde ein Anthropologe später diesen Ort aufsuchen, hielte er die zurückgelassenen Geräte vielleicht für Spuren einer primitiven menschlichen Kultur. Noch vor kurzem hätte niemand einem Menschenaffen dergleichen zugetraut. Schon manches Mal haben die Schimpansen Primatologen mit unerwarteten Fähigkeiten verblüfft. In den letzten zehn Jahren mussten die Wissenschaftler wieder einmal feststellen, dass die Ähnlichkeiten mit dem Menschen viel tiefer wurzeln als sie bisher glaubten.

Wenn beispielsweise in Taï Schimpansen Nüsse mit Steinen zerschlagen, vollführen sie nicht etwa ein allgemein schimpansenübliches Verhalten. Denn das machen diese Menschenaffen nur in Westafrika, und auch dort nicht überall. Wir werten dies darum als Ausdruck einer regelrechten Schimpansenkultur. Praktisch das ganze Jahr hindurch beschaffen die Taï-Schimpansen sich Nüsse. An Coula-Nüssen gibt es dort fünf Arten – irgendwelche sind immer gerade reif. Für die härtesten Nüsse benutzen die Affen sehr harte Steine, obwohl diese in der Gegend selten zu finden sind.

Nun verwenden Verhaltensforscher den Begriff „Kultur" zwar häufiger. Im Zusammenhang mit Tieren bezeichnen sie damit aber meist eher elementares Verhalten, etwa regionale Dialekte bei Singvögeln. Doch bei den Schimpansen handelt es sich um mehr. Ihre Vielfalt und Fülle an offensichtlich tradierten Handlungen übertrifft nur noch der Mensch.

Seit zwei Jahren erforschen wir gezielt die Unterschiede zwischen den Schimpansenkulturen in verschiedenen Regionen Afrikas. An diesem in seiner Art beispiellosen Projekt wirken alle bedeutenderen Wissenschaftlerteams mit, die dort einzelne Schimpansenpopulationen beobachten. Schon in dieser kurzen Zeit konnten wir erstaunlich viele und vielfältige spezielle kulturelle Muster dokumentieren. Wir erfassen in der Studie alles: vom Werkzeuggebrauch bis zu

Fast fünf Kilogramm wiegt der Granitstein, mit dem dieser erwachsene männliche Schimpanse Nüsse zerschlägt. Der Affe lebt im Taï-Regenwald in Westafrika.


CH. BOESCH



CH. BOESCH

M. NICHOLS / NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION

Der Gebrauch von Werkzeug wird in Schimpansengemeinschaften tradiert. Diese jungen Tiere aus Taï beobachten ihre Mütter beim Nüsse-Knacken mit einem Holz oder einem Stein. Nur in Westafrika öffnen Schimpansen Nüsse mit Hilfe eines „Hammers". Aber selbst dort tritt das Verhalten nicht überall auf. So bildet im Taï-Gebiet offenbar ein Fluss regelrecht eine Kulturbarriere: Von Gruppen, die nur wenige Kilometer entfernt leben, scheinen nur die Affen westlich des Flusses das Nüsse-Knacken zu kennen.

Formen der Kommunikation und sozialen Gepflogenheiten. Schon die bisher in diesem großen Projekt gewonnenen Daten zeigen die Schimpansen in einem neuen Licht. Zugleich rütteln die neuen Erkenntnisse an unserem Selbstbild als Menschen, weil sie vielleicht auf die Wurzeln unserer Kulturfähigkeit weisen. Diese Ursprünge könnten deutlich älter sein als bisher vermutet. Wenn das zutrifft, dann stünden wir nicht ganz so einzigartig da wie bisher angenommen.

So nahe uns die Schimpansen genetisch stehen – zu über achtundneunzig Prozent besitzen wir, der *Homo sapiens*, das gleiche Erbgut wie *Pan troglodytes*, der „Gemeine Schimpanse" –, wussten wir doch bis vor vierzig Jahren praktisch nichts über ihr Leben in Freiheit. Als dann die Feldforschungen an diesen Menschenaffen einsetzten, überschlugen sich bald die Sensationsmeldungen.

Anfang der sechziger Jahre nahm die Engländerin Jane Goodall in Gombe – inzwischen Tansania – ihre berühmten Pionierstudien auf. Fünf Jahre später gründete Toshisada Nishida von der Universität Kyoto in Japan eine Feldstation in Mahale in Tansania.

Die Tiere an die Anwesenheit von Menschen zu gewöhnen, war für die Forscher äußerst mühsam. Dann aber wurden sie Zeuge vieler unerwarteter Verhaltensweisen, darunter

- Herstellung und Gebrauch von Werkzeug,
- Jagd auf kleinere Affen, die dann gefressen wurden,
- Abgeben von der Jagdbeute an Gruppenmitglieder sowie
- mitunter tödlich ausgehende Fehden zwischen benachbarten Schimpansengemeinschaften.

Den beiden Pionieren folgten weitere Forscher, die in anderen Gebieten Afrikas Camps zum Schimpansenstudium errichteten. Trotz der immensen finanziellen, politischen und organisatorischen Hindernisse hielten einige der Stationen bis heute durch. So verfügen wir nun über langjährige umfangreiche Aufzeichnungen über das Leben von Schimpansen, und dies gleich für mehrere weit voneinander entfernte Gegenden in Afrika.

Schon 1973 äußerte Jane Goodall, dass die Affen in Gombe nicht alles genauso machten wie die anderer Populationen. Sie beschrieb dreizehn Arten von Werkzeuggebrauch und acht soziale Aktivitäten, die in Gombe anscheinend anders ▶

Projekt Schimpansen-Kulturen

Vergleich der Gesellschaften

Schon seit Jahrzehnten suchen Wissenschaftler nach Anzeichen von Kultur bei Schimpansen. Leider hatten diese Studien aber allzu oft eine entscheidende Schwäche. Meistens wurden dafür nur die Angaben aus veröffentlichten Arbeiten ausgewertet, welche die einzelnen Feldforscher jeweils über eine bestimmte Schimpansengemeinschaft verfasst hatten. Bei dieser Methode dürfte vieles an kulturellen Unterschieden übersehen worden sein. Aus drei Gründen erscheint das Vorgehen unzureichend:

➤ Forscher publizieren gewöhnlich keine ausführliche Liste all dessen, was sie nicht gesehen haben. Aber genau das müssen wir wissen. Wir benötigen ebenso gründliche Angaben zu den vorhandenen wie zu den nicht vorhandenen Verhaltensweisen.

➤ In vielen Arbeiten erfährt man zwar, dass eine bestimmte Handlung vorkommt, aber nicht, wie häufig. Auch das kann in die Irre führen. Es ist ein großer Unterschied, ob das Verhalten regelmäßig auftritt und somit als Teil der Kultur dieser Affen gelten kann oder nur ein einziges Mal vorkam.

➤ Die Beschreibungen des Verhaltens sind oft nicht sehr präzis. Dies macht es schwierig festzustellen, ob die Schimpansen an einem anderen Ort wirklich das Gleiche tun.

Wir (die Autoren dieses Artikels) sind deswegen anders vorgegangen. Wir baten die einzelnen Freilandteams, alles Verhalten aufzulisten, das ihrer Meinung nach bei den von ihnen beobachteten Schimpansen auf Tradition beruht. Aus den gesamten Angaben erstellten wir einen Katalog von fünfundsechzig Aktivitäten, die als Kulturmerkmale in Frage kamen.

Diesen Katalog verteilten wir an die Leiter der Freilandprojekte. Sie sollten zu jedem aufgelisteten Verhalten angeben, ob es in ihrem Gebiet überhaupt auftritt und wenn ja, wie häufig. Dazu gaben wir folgende Hauptkategorien vor:

➤ „üblich“ – alle oder fast alle Tiere zeigen das Verhalten; bzw. die meisten Angehörigen einer bestimmten Altersklasse oder eines Geschlechts benutzen es;

➤ „gebräuchlich“ – das Verhalten tritt nur gelegentlich auf, aber etliche der Tiere zeigen es immer wieder;

➤ „vorhanden“ – tritt zwar auf, kommt aber recht selten vor;

➤ „fehlt“ – trotz langjähriger gründlicher Beobachtungen nie gesehen;

➤ „nicht bekannt“ – die Daten reichen nicht aus, um eine Entscheidung treffen zu können.

Diese Studie enthält die langjährigen Befunde über sieben Schimpansengesellschaften, die inzwischen an anwesende Menschen gewöhnt sind. Alles in allem fließen die Daten von mehr als 150 Jahren Beobachtung wilder Schimpansen ein.

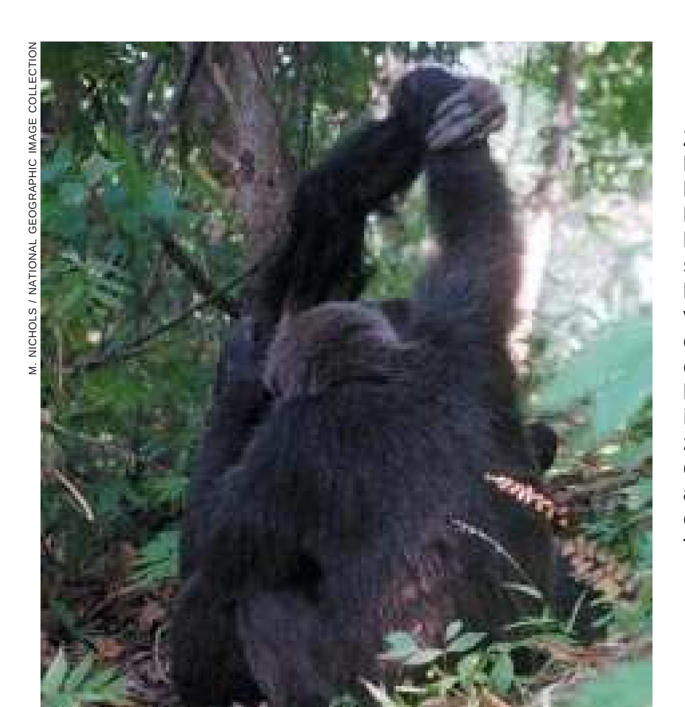
Am meisten interessierten uns natürlich solche Verhaltensmuster, die an mindestens einem Ort gar nicht vorkommen und an mindestens einem anderen Ort wenigstens gelegentlich. Eine Aktivität, auf die beides zutrifft, werten wir als kulturell. Tätigkeiten, die umweltbedingt an manchen Orten nicht ausführbar sind, können wir nicht einbeziehen. Beispielsweise fischen nur die Bossou-Schimpansen mit Stöcken nach Algen, die sie dann verspeisen. Dies liegt daran, dass nur in ihrem Lebensraum entsprechende algenreiche Gewässer existieren.

Am Ende blieben neununddreißig Verhaltensmuster, die unseres Erachtens als kulturell unterschiedlich eingestuft werden dürfen. Darunter fallen zahlreiche Arten des Werkzeuggebrauchs, viele Methoden der Fellpflege und auch Verhaltensweisen im Bereich der Paarung. Dieser Reichtum an Kultur bei Schimpansen übertrifft bei weitem alles, was Verhaltensforscher hierzu bei anderen Tieren entdeckten.

waren. Bereits damals vertrat sie die zu der Zeit gewagte Ansicht, dass einige dieser Unterschiede wohl kulturellen Ursprungs seien. Nur – was meinte sie eigentlich mit „Kultur“? Kurz gesagt verstehen Anthropologen darunter das, was Menschen zu einer bestimmten Zeit in einer abgrenzbaren Region an Bräuchen und Errungenschaften hervorbringen.

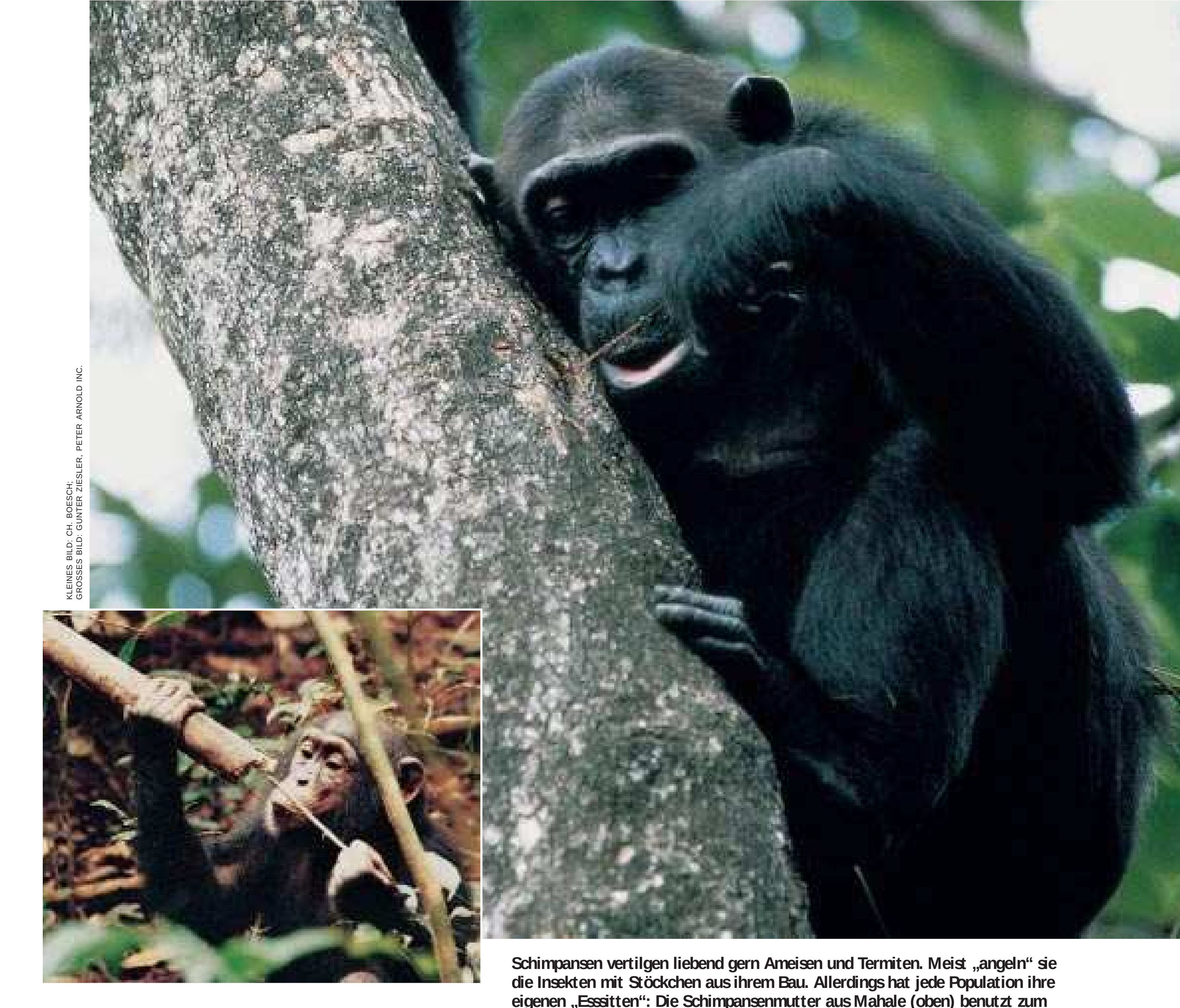
Eine Kultur des Menschen etwa umfasst Technologien genauso wie Heiratsbräuche, sie reicht von Esssitten bis hin zu Mythen oder Legenden. Tiere haben natürlich keine Erzählungen. Wie Verhaltensforscher gezeigt haben, können manche Tiere aber erlernte, also nicht genetisch bestimmte, Verhaltensmuster an spätere Generationen weitergeben, manche Vögel etwa Gesangsweisen. Aus biologischer Sicht stellt dies das grundlegende Kriterium für ein kulturelles Merkmal dar: Man erwirbt ein populationsspezifisches Verhalten, indem man es bei anderen beobachtet, und gibt es später seinerseits auf gleichem Wege weiter. In diesem schlichten Sinne haben auch Schimpansen sicherlich Kultur. Aber meinte Goodall mit dem Begriff nicht mehr?

Die achtziger Jahre brachten in diesen Forschungen einen Durchbruch. In einer der Schimpansenpopulationen im Taï-Gebiet beobachteten Hedwige Boesch und ich (Christophe Boesch) ein spektakuläres Verhalten: die Verwendung eines „Hammers“ beim Zerschlagen von Nüssen. Von den ostafrikanischen Schimpansen-Gruppen war so etwas trotz jahrzehntelanger Beobachtungen unbekannt. Verschiedene Forscher fanden nun die Zeit reif dafür, die Unterschiede zwischen den Populationen einmal systematisch zusammen-



M. NICHOLS / NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION

Zwei Schimpansenmänner aus Mahale halten sich beim Lausen fest an der Hand. Diese Haltung ist auch für Taï und Kibale recht typisch. In Gombe sahen Jane Goodall und ihre Mitarbeiter Gleiches während vierzig Jahren nicht. Dort ergreifen die Tiere höchstens einen Ast über ihrem Kopf. Nach neueren Beobachtungen in Mahale fassen die Affen zweier benachbarter Gruppen die Hand des Partners sogar auf verschiedene Weise: In der einen berühren sich die Handflächen, in der anderen nicht.



KLEINES BILD: CH. BOESCH; GROSSES BILD: GUNTER ZIESLER, PETER ARNOLD INC.

Schimpansen vertilgen liebend gern Ameisen und Termiten. Meist „angeln“ sie die Insekten mit Stöckchen aus ihrem Bau. Allerdings hat jede Population ihre eigenen „Esssitten“: Die Schimpansenmutter aus Mahale (oben) benutzt zum Beispiel ein kurzes Stäbchen, um Baumameisen zu erwischen. Ein Schimpansenkind in Taï schleckt Honig und Larven von Holzbienen (links).

zustellen. In seinem 1992 erschienenen Buch listete William C. McGrew von der Universität Miami für Schimpansen neunzehn Umgangsweisen mit Werkzeugen auf, die sich lokal unterscheiden. Und zusammen mit dem Psychologen Michael Tomasello, meinem Kollegen am Max-Planck-Institut für Evolutionäre Anthropologie in Leipzig, trug ich Ende 1998 fünfundzwanzig Verhaltensweisen zusammen, die unseres Erachtens in den Schimpansengemeinschaften kulturell tradiert sein könnten.

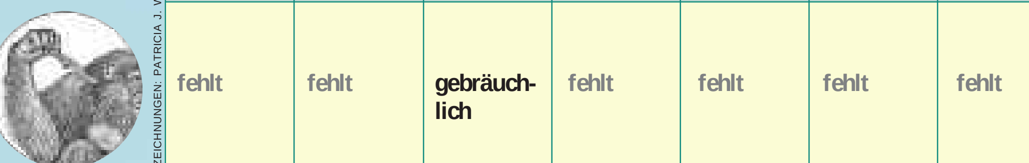
Inzwischen konnten wir diese Liste beträchtlich erweitern. Neun führende Schimpansen-Experten haben daran mitgewirkt, darunter beide Autoren dieses Artikels. Wir haben hierfür einen Großteil der Feldbeobachtungen an Schimpansen überhaupt ausgewertet (siehe Kasten links). Insgesamt umfasst dies 151 „Beobachtungsjahre“. Unser Katalog enthält nun neununddreißig Verhaltensmuster, denen wir einen kulturellen Hintergrund zuschreiben (siehe Kasten folgende Doppelseite).

Für weitgehend kulturell geformt halten wir zum Beispiel die verschiedenen Methoden, mit denen Schimpansen mit einem Halm oder Stöckchen nach Ameisen oder auch nach Termiten „angeln“. Die „Angel“ kann unterschiedlich aussehen: je nach Technik kürzer oder länger, dünner oder dicker, aus weicherem oder härterem Material. Völlig verschieden ist auch die Weise, wie der Schimpanse die Insekten in seinen Mund befördert. Zum Termitenangeln mag er etwa einen ziemlich dünnen, biegbaren Halm benutzen. Den taucht er durch eine kaum sichtbare Öffnung in einen Gang des Termitenhügels. Dann bringt er die Termiten mit einer leichten Bewegung aus dem Handgelenk dazu, sich in das Werkzeug zu verbeißen. Nun zieht er den Halm wieder heraus und frisst die angeklammerte Beute vom Halm. Für Ameisen nimmt er stattdessen vielleicht ein kurzes, steifes Stöckchen. Dieses steckt er in einen Ameisenhügel. Die Ameisen krabbeln daran hoch, er holt die Rute heraus und knabbert die Beute ab. Oder er verwendet ein etwas längeres Werkzeug, zieht dieses dann rasch durch die geschlossene Faust der anderen Hand und schiebt sich gleich einen ganzen Ameisenklumpen in den Mund. Kulturell ▶

Steckbriefe von Schimpansen-Kulturen

Die Forscher von sechs Freilandstationen in West- und Ostafrika beteiligten sich an einer Studie zum Kulturvergleich von sieben Schimpansengesellschaften (in Mahale werden zwei beobachtet). Anhand einer Liste bewerteten sie, ob ein bestimmtes Verhalten in der jeweiligen Gesellschaft „üblich“ ist, nur gelegentlich „gebräuchlich“ ist, zwar „vorhanden“ ist, aber selten vorkommt, oder ganz „fehlt“ (Kasten Seite 32). Wenn keine aussagekräftigen Daten vorliegen, fällt dies unter „nicht bekannt“. Auch wenn ein Verhalten „umwelt“bedingt nicht möglich ist, wird dies angezeigt. Beispielsweise gibt es in Budongo keine Coula-Nüsse wie in Taï, wo die Schimpansen diese Früchte aufhämmern. Insgesamt erwiesen sich neununddreißig Verhaltensweisen als kulturell verschieden. Achtzehn davon sind in dieser Tabelle angeführt.

	Bossou	Taï-Wald	Gombe	Mahale M-Gruppe	Mahale K-Gruppe	Kibale	Budongo
Nüsse zerschlagen Der Schimpanse benutzt einen Stein oder ein Holzstück als „Hammer“, um die harte Schale nahrhafter Nüsse zu zerschlagen. Eine flache Wurzel oder ein Stein dient als „Amboss“, als widerstandsfähige Unterlage. 	üblich	üblich	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt (umwelt-bedingt?)	fehlt (umwelt-bedingt)
Mit dem Stößel Löcher stoßen Der Schimpanse nimmt Schößlinge der Ölpalme als Stößel, um Löcher in Baumstämme zu stoßen oder welche zu vertiefen. 	üblich	fehlt	fehlt	fehlt (umwelt-bedingt?)	fehlt (umwelt-bedingt?)	fehlt (umwelt-bedingt?)	fehlt (umwelt-bedingt?)
Termitenangeln Der Schimpanse steckt ein dünnes, biegsames, halmähnliches Werkzeug in einen Termitenhügel, zieht dieses wieder heraus und vertilgt die darin verbissenen Tiere. 	fehlt	fehlt (umwelt-bedingt)	üblich	fehlt	üblich	fehlt (umwelt-bedingt)	fehlt (umwelt-bedingt?)
Ameisen vom Stock mit Hand abstreifen Der Schimpanse hält ein Stöckchen ins Ameisennest und wartet, bis die Insekten halb daran hochgekrabbelt sind. Dann zieht er das Werkzeug durch die Faust und befördert die Hand voll Ameisen auf einmal in den Mund. 	vorhanden	fehlt	üblich	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
Ameisen direkt vom Stöckchen abfressen Der Schimpanse knabbert die Ameisen direkt vom Stöckchen ab, sobald ein paar Insekten daran hochgekrabbelt sind. 	üblich	üblich	vorhanden	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
Knochenmark gewinnen Mit Hilfe eines kleinen Stöckchens holt sich der Schimpanse das Mark aus den langen Röhrenknochen eines erjagten Affen.  	fehlt	üblich	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
Sitzen auf Blättern Der Schimpanse richtet sich mit ein paar großen Blättern eine Unterlage zum Sitzen. Anscheinend macht er das, um nicht auf feuchtem Boden sitzen zu müssen. 	vorhanden	gebräuch-lich	fehlt	fehlt	fehlt	vorhanden	fehlt
Fliegen wegfächeln Um Fliegen zu vertreiben, benutzt der Schimpanse belaubte Zweige als Fächer. 	fehlt	gebräuch-lich	vorhanden	fehlt	fehlt	fehlt	gebräuch-lich
Sich mit einem Gegenstand kratzen Der Schimpanse nimmt manchmal einen Stein oder ein Stöckchen, um damit am eigenen Körper besonders kitzlige Stellen zu kratzen. 	fehlt	fehlt	gebräuch-lich	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt



ZEICHNUNGEN: PATRICIA J. WYNNE; KARTE: SUE CARLSON

Bossou, Guinea

Taï-Wald, Elfenbeinküste

Budongo, Uganda

Kibale, Uganda

Gombe, Tansania

Mahale, Tansania

Bossou	Taï-Wald	Gombe	Mahale M-Gruppe	Mahale K-Gruppe	Kibale	Budongo
üblich	üblich	üblich	üblich	fehlt	vorhanden	vorhanden
fehlt	vorhanden	vorhanden	fehlt	fehlt	üblich	fehlt
üblich	üblich	fehlt	üblich	üblich	gebräuch-lich	üblich
fehlt	fehlt	gebräuch-lich	unbekannt	unbekannt	fehlt	fehlt
fehlt	fehlt	vorhanden	unbekannt	unbekannt	fehlt	üblich
fehlt	üblich	vorhanden	fehlt	fehlt	fehlt	fehlt
fehlt	gebräuch-lich	fehlt	üblich	üblich	üblich	fehlt
vorhanden	üblich	gebräuch-lich	üblich	üblich	fehlt	fehlt
fehlt	gebräuch-lich	üblich	üblich	üblich	üblich	gebräuch-lich

Werfen
Der Schimpanse schmeißt gezielt mit einem Gegenstand – etwa mit einem Stein oder Stock. Allerdings treffen die Tiere oft schlecht.

Eine Wunde mit Blättern untersuchen
Der Schimpanse betupft eine eigene Wunde mit Blättern, die er anschließend genau begutachtet. Manchmal zerkaut er die Blätter vorher.

Geräuschvoll Blätter zerfetzen
Der Schimpanse, ein Männchen, sucht die Aufmerksamkeit von Spielkameraden oder paarungsbereiten Weibchen auf sich zu ziehen, indem er mit lautem Geräusch Blätter mit den Zähnen zerfetzt. Er frisst die Blätter nicht.

Fellparasiten auf Blatt zerquetschen
Der Schimpanse setzt einen Parasiten, den er im Fell eines Kumpans aufgestöbert hat, auf ein Blatt, das er auf der Handfläche hält. Dort zerdrückt er ihn mit dem Finger und frisst ihn nachher meistens.

Parasiten begutachten
Der Schimpanse setzt Parasiten, die er im Fell des Partners fand, auf ein Blatt in seiner Handfläche. Dort betrachtet er das Tier zunächst genau. Dann erst entscheidet er, ob er es frisst oder wegwirft.

Parasiten mit dem Finger innen auf dem Arm zerdrücken
Der Schimpanse setzt einen Schmarotzer aus dem Fell eines Partners auf den eigenen Unterarm. Er schlägt mehrmals mit dem Finger darauf und vertilgt das Tier.

Handklammern mit erhobenen Armen
Zwei Schimpansen geben sich die Hand über dem Kopf, während sie sich mit der freien Hand gegenseitig lausen.

Mit den Knöcheln klopfen
Der Schimpansenmann versucht die Aufmerksamkeit eines Weibchens zu erregen, indem er mit den Fingerknöcheln gegen Baumstämme oder andere harte Oberflächen klopft.



Regentanz
Ein beginnender Regenguss animiert erwachsene Schimpansenmänner zu einer lauten Kraftdemonstration. Sie jagen herum, zerren dabei Äste hinter sich her, hauen auf den Boden und prügeln auf Brettwurzeln ein.

übermittelt scheint beispielsweise auch die Gewohnheit mancher Gruppen zu sein, sich aus Blättern einen trockenen Sitzplatz herzustellen. Ebenso dürften etliche Verhaltensmuster beim sozialen Lausen tradiert sein. Mit dieser kulturellen Vielfalt sind Schimpansen innerhalb der Tierwelt unerreicht. Man könnte sogar sagen, dass sie in dieser Hinsicht unter den Tieren eine eigene Klasse bilden.

Was aber ihre Ähnlichkeit mit dem Menschen betrifft, so ist der Unterschied natürlich immer noch immens. Die Differenziertheit der menschlichen Kulturen ist schier unermesslich. Doch auch den Reichtum sowie die Komplexität der Schimpansenkulturen haben wir bestimmt noch lange nicht erfasst. Die Forschungen darüber beginnen eigentlich erst. Wahrscheinlich schürfen wir bei diesen Fragen gerade an der Oberfläche.

Lernen durch Probieren oder Tradition?

Können Affen „nachäffen“?

Wer Menschenaffen im Zoo herumtollen sieht, mag ohne weiteres glauben, dass diese geistig beweglichen Tiere in der Lage sind, Verhalten anderer nachzuahmen. Doch Wissenschaftler sind sich in dieser Frage gar nicht einig.

Nehmen wir ein Beispiel vom Taï-Wald in Westafrika: Dort schauen Schimpansenkinder ihrer Mutter manchmal zu, wenn sie Nüsse öffnet. Meistens werden die Sprösslinge irgendwann selbst Nüsse in der gleichen Weise öffnen. Nun ist die Frage: Imitiert der junge Schimpanse wirklich seine Mutter? Es könnte ja sein, dass der konzentrierte Eifer der Mutter beim Nüsseknacken das Kind anregt, sich voller Interesse mit diesem offenbar leckeren Futter zu beschäftigen. Es könnte nun ganz erpicht darauf sein, die Nüsse aufzukriegen und deswegen das Öffnen mit einem Hammer schließlich durch reines Herumprobieren herausfinden.

In den Diskussionen über Schimpansenkulturen ist dieser Unterschied sehr wichtig. Nach Auffassung mancher Wissenschaftler zeichnet sich ein kulturelles Merkmal dadurch aus, dass die jüngere Generation das Verhalten durch Nachahmung der älteren erwirbt. Wenn aber ein junger Schimpanse, sobald er nur einen geeigneten Hammerstein in die Hände bekommt, ganz allein herausfindet, wie er eine Nuss öffnen kann, darf man dies nicht als Kulturmerkmal bewerten. Würden Schimpansen alle Techniken immer nur durch reines Ausprobieren lernen, gewissermaßen also das Rad stets neu erfinden, könnte daraus nie eine kumulative Kultur entstehen.

Ob Schimpansen überhaupt durch Nachahmung lernen können, lässt sich am besten in Experimenten mit Zootieren klären. Dazu erfand ich (Whiten) zusammen mit Deborah M. Custance vom Goldsmith College in London künstliche „Früchte“: Behältnisse mit essbarem Inhalt, die nicht ganz leicht zu öffnen sind (Bild). Die vorwiegend jugendlichen Zooschimpansen konnten Menschen beim „Schälen“ dieser „Früchte“ zuschauen. Und zwar führten wir ihnen zwei völlig verschiedene komplizierte Schältechniken vor, allerdings jedem Einzeltier nur eine davon. Dann durften sie selbst ihr Geschick zeigen. Tatsächlich versuchten die jungen Schimpansen sich tendenziell eher in der ihnen demonstrierten Technik. Ähnliche Tests führten wir mit dreijährigen Kindern durch. Wie sich dabei herausstellte, ahmen sechsjährige Schimpansen in sehr ähnlicher Weise nach wie dreijährige Kinder. Allerdings imitieren sie den Ablauf im Allgemeinen etwas ungenauer.

Eine völlig andere Studie führte ich (Boesch) gemeinsam mit Mitarbeitern mit den Schimpansen des Züricher Zoos durch. Wir gaben den Affen Nüsse und zum Hämmern geeignete Steine ähnlich denen in Taï. Im Vergleich zu ihren westafrikanischen Vettern stellten die Zooschimpansen mit den Gegenständen viel mehr Verschiedenes an. In Taï erscheinen die Handlungen eingegrenzter, aber auch zielgerichteter. Wir vermuten, dass die schon kulturell geprägte Umgebung das Verhalten der jungen in der Wildnis aufwachsenden Schimpansen in Richtung der nützlichsten Fertigkeiten lenkt. Im Zoo können sich Schimpansen nicht an Traditionen orientieren. Deshalb probieren sie dort auch viele nicht besonders zweckmäßige Handlungen.

Interessanterweise passt diese Deutung gut zu einigen Ergebnissen der „Schäl“-Experimente. In einer Testreihe mit den „Früchten“ übernahmen die Schimpansen eine ganze Handlungssequenz – aber erst nach mehrmaliger Vorführung, und auch erst, nachdem sie zuvor verschiedene selbst ausgedachte Alternativen durchprobiert hatten. Sie verwarfen also ihre eigenen Erfahrungen zu Gunsten des Vorbilds.

Schimpansen können nachäffen – das ist unser Schluss aus diesen Befunden. Nach unserer Ansicht bildet diese Fähigkeit zu imitieren bei ihnen einen der Stränge zur Weitergabe kultureller Inhalte. Wie sonst hätten sich die grundverschiedenen lokalen Traditionen ausbilden können – ob die einzelnen Techniken beim Ameisenangeln oder die Art, wie sie mit Fellparasiten verfahren?

Festzuhalten bleibt jedoch, dass manche Kulturmerkmale – wie beim Menschen auch – zweifellos durch ein Zusammenspiel von Nachahmung und einfacheren Formen des sozialen Lernens vermittelt werden. So mag auch wichtig sein, dass in dem Tier durch andere Interesse für ein augenscheinlich nützliches Werkzeug geweckt wird. In jedem Fall aber lernt der junge Schimpanse von den älteren Artgenossen, was er zum Leben im Urwald braucht.

SARAH MARSHALL, ANDREW WHITEN / NGAMBA, UWEX, UGANDA

Der junge Schimpanse hat Menschen zugesehen, als sie die „Schale“ dieser „Frucht“ öffneten. Nun versucht er sich selbst an dieser harten Nuss. Wird er dabei die vorgeführte Methode ausprobieren?



DAVID BYGOTT, KIBUYU PARTNERS

Scheinbar hingebungsvoll „laust“ dieser Schimpanse in Gombe Blätter. Tatsächlich begutachtet er jedoch ein Insekt, das er soeben im Fell eines Artgenossen aufspürte. Die Affen in Gombe setzen die gefundenen Parasiten auf Blätter, um sie vor dem Verspeisen sorgsam mit dem Daumennagel zu zerdrücken. Auch in Budongo platziert man sie auf ein Blatt. Sie werden aber nur begutachtet – dann gegessen oder weggeworfen. Alle ostafrikanischen Gruppen, nicht aber die westafrikanischen, benutzen beim Lausen häufig Blätter. Diese Vorliebe könnte darum auf einen gemeinsamen Ursprung zurückgehen.

Wenn Anthropologen beim Menschen von „amerikanischer“ oder „chinesischer“ Kultur sprechen, fassen sie damit ein Konglomerat von Erscheinungen zusammen: Sprache, Kleidung, Essgewohnheiten, Heiratsbräuche und vieles mehr. Andere bekannte tradierte Verhaltensweisen bei Tieren stehen gewöhnlich für sich allein. Noch nie fanden Ornithologen, dass der Gesangsdialekt eines Singvogels etwa mit einer eigenen Art des Balzens oder Futtersuchens einhergeht.

Bei Schimpansen jedoch ist das anders. Jede der untersuchten Populationen weist ein ganzes Bündel tradierter Verhaltensweisen auf. Wir sprechen inzwischen von einer „Gombe“- oder einer „Taï“-Kultur. Durch diese spezifischen Gesamtmuster lässt jedes Tier erkennen, welcher Gemeinschaft es angehört.

Zwei Beispiele: Ein bestimmter Affe pflegt mit Hilfe eines „Hammers“ Nüsse zu knacken; bevor er seine Aufmerksamkeit heischende, laute Trommelshow aufführt, steckt er sich ein hartes Blatt zwischen die Zähne, von dem er geräuschvoll Stücke abreißt; paarungsbereite Weibchen versucht er unter anderem auf sich aufmerksam zu machen, indem er mit den Fingerknöcheln diskret auf einen Baumstamm klopft; zum Ameisenangeln nimmt dieser Affe ein kurzes Stöckchen und frisst die Ameisen, die daran hochkrabbeln, direkt vom Stock ab. Kein Zweifel – dieser Schimpanse lebt in Taï. Von einem anderen Tier wissen wir, dass es mit den Zähnen geräuschvoll kleine Stücke von Blättern abreißt, um sich bemerkbar zu machen. Außerdem hebt der Affe bei der sozialen Fellpflege den Arm des Partners an der Hand hoch. Beide Verhaltensweisen zugleich sind nur in Kibale und Mahale üblich. Des weiteren pflegt dieser Schimpanse manchmal Baumameisen zu „angeln“. Dies zusammen mit den anderen beiden Merkmalen weist ihn als Angehörigen der „Mahale-Kultur“ aus.

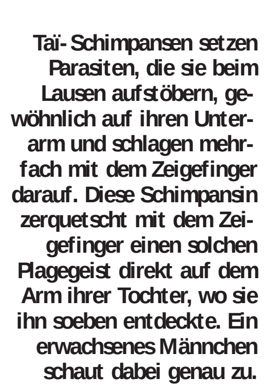
Die Unterschiede zwischen den Schimpansen-Populationen gehen in manchem auch noch ins Detail. Zudem erreichen manche Gruppen den gleichen Zweck auf etwas andere Weise. So beseitigen alle Gruppen Ungeziefer, das sie beim Lausen finden. In Taï zerdrückt man das Tier dann aber manchmal mit dem Finger auf dem Unterarm, während man es in Gombe auf einem Blatt totquetscht und dann erst frisst. Dagegen inspizieren die Schimpansen in Budongo das Insekt zuerst auf einem Blatt und entscheiden dann, ob es gefressen werden soll oder nicht.

Andererseits kann ein Verhalten gleich aussehen, aber in anderem Zusammenhang benutzt werden. Das laute Zerfetzen von Blättern mit Hilfe der Zähne dient in Mahale den Männchen zur Paarungsaufforderung. In Taï ist es Teil der demonstrativen Trommelshow.

Die neuen Befunde über Schimpansenkulturen sind in vieler Hinsicht von recht großer Tragweite. Nicht nur haben die Daten unsere Einschätzung dieser Menschenaffen entscheidend verändert. Vielmehr beleuchten sie auch die Sonderstellung des Menschen in neuer Weise. Als wir diese Erkenntnisse vor zwei Jah- ▶



CH. BOESCH



Taï-Schimpansen setzen Parasiten, die sie beim Lausen aufstöbern, gewöhnlich auf ihren Unterarm und schlagen mehrfach mit dem Zeigefinger darauf. Diese Schimpansin zerquetscht mit dem Zeigefinger einen solchen Plagegeist direkt auf dem Arm ihrer Tochter, wo sie ihn soeben entdeckte. Ein erwachsenes Männchen schaut dabei genau zu.


CH. BOESCH

Eine Taï-Schimpansin und ihr Kind waschen Früchte vor dem Verzehr.

ren in der englischen Fachzeitschrift „Nature“ publizierten, reagierten manche unserer Kollegen ziemlich konsterniert. Offenbar fiel es ihnen recht schwer zu akzeptieren, dass sich der Mensch von den Tieren in puncto Kulturfähigkeit nicht grundsätzlich unterscheidet – dass er nicht mehr die einzige Art sein soll, die Kultur im Sinne des Wortes hervorgebracht hat. Die harsche Kritik erscheint uns jedoch nicht angebracht. Sie dürfte sogar auf einem Missverständnis beruhen. Die menschliche Kulturleistung steht nach wie vor unendlich hoch über dem, was Schimpansen zeigen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen menschlichen Kulturen sind unvergleichlich viel größer, allein schon dank der Sprache, die Fertigkeiten, Sitten und Bräuche tradieren hilft. Das, was wir nun über Schimpansen wissen, lässt besser noch als früher ermessen, wie sehr der Mensch sich von ihnen abhebt. Die neuen Befunde tun unserem Selbstverständnis keinen Abbruch, sondern stellen unsere Einzigartigkeit bloß klarer heraus.

Viele unserer kulturellen Errungenschaften sind der Tatsache zu verdanken, dass der Mensch die Dinge weiterentwickelt und seinen Zwecken immer besser anpasst. Man nehme nur die Idee des Hammers. Von einem unbearbeiteten Stein bis zu einem elektronisch gesteuerten Roboterhammer ist es ein weiter Weg, der viele Neuerungen und Verbesserungsschritte erforderte. Vielleicht deutet sich bei Schimpansen ein allererster Anfang für solch einen kumulativen Kulturprozess an. Beispielsweise verhindern die Schimpansen von Bossou, dass Steinambosse auf unebenem Gelände wackeln, indem sie Steine als Keile darunterschieben.

Sie machen das aber auch dort nur selten. Im Vergleich zur menschlichen Kultur nehmen sich derartige Leistungen der Schimpansen höchst bescheiden aus.

Eines machen diese Untersuchungen jedoch deutlich: Unsere Veranlagung, Kultur zu erschaffen, entstand nicht plötzlich mit dem Erscheinen des Menschen aus dem Nichts heraus. Die geistigen Voraussetzungen dafür könnten aus einfacheren Anfängen, aus Vorstufen, entstanden sein und somit sehr frühe Wurzeln haben. Vorstellbar ist zumindest, dass unter anderem soziales Lernen ähnlich dem bei Schimpansen unseren Vorfahren vor zwei Millionen Jahren erlaubte, die ersten Steinwerkzeug-Kulturen zu schaffen.

Ob Schimpansen als einzige Tiere eine Kulturfähigkeit besitzen, die der des Menschen entfernt gleicht, müssen zukünftige Forschungen erweisen. Gerade jetzt liegen Hinweise vor, dass wir auch andere Arten in die Diskussion einbeziehen sollten. Einige Orang-Utans auf Sumatra benutzen gelegentlich mindestens zwei Sorten von Werkzeugen. Dies zeigte eine Studie von Carel P. Schaik und seinen Kollegen von der Duke-Universität in Durham (US-Bundesstaat North Carolina). Bei anderen Orang-Populationen beobachtete das bisher niemand, trotz jahrelanger Feldforschungen. Auch die Wale erscheinen in dieser Hinsicht interessant. Bei diesen Meeressäugern dokumentieren Hal Whitehead und sein Team von der Dalhousie University in Halifax (Kanada) zur Zeit Parallelen zwischen Gesangsdialekten und Methoden der Nahrungsbeschaffung. Natürlich würden wir es begrüßen, wenn sich unser Ansatz, mit dem wir die Schimpansenkulturen vergleichen, für die Erforschung dieser anderen Arten als nützlich erwiese.

Und nicht zuletzt: Was bringen die neuen Erkenntnisse den Schimpansen selbst? Gerade heute, da wir diese uns in vielem so ähnlichen Geschöpfe endlich ein wenig kennen lernen, werden sie in großer Zahl abgeschlachtet. Der Gesamtbestand ging im vergangenen Jahrhundert beträchtlich zurück und nimmt immer noch weiter rasant ab. Schuld daran tragen illegal gestellte Fallen, Waldrodungen und in letzter Zeit besonders auch der Handel mit Wildfleisch aus dem Busch, der bereits alarmierende Ausmaße hat. Er weitete sich aus, weil zur Holzgewinnung angelegte befahrbare Schneisen in die Urwälder hinein den Zugang zu den Wildtieren und ihren Abtransport erleichtern. Schimpansenfleisch wird bereits weltweit vertrieben, auch in Europa. Der Mensch dezimiert aber nicht nur eine Tierart, sondern er vernichtet mit jeder Schimpansenpopulation eine eigene Kultur.

Ein kleiner Hoffnungsschimmer bleibt. Eben diese Vielseitigkeit der Kulturen könnte die Einwohner der betreffenden Länder umstimmen, die letzten Schimpansenbestände zu retten. In einigen wenigen Gegenden verzeichnen Naturschützer mit Aufklärungskampagnen bereits Erfolge. In Zaïre meinte ein Mann, nachdem er an einer Filmvorführung über die geistigen Leistungen dieser Menschenaffen teilgenommen hatte: „Der Affe ist ja wie ich! Den kann ich nicht mehr essen!“ ■

Andrew Whiten *und* ***Christophe Boesch*** *arbeiten seit 1998 gemeinsam an der kulturvergleichenden Schimpansen-Studie. Whiten ist Professor für evolutionäre und Entwicklungspsychologie an der Universität St. Andrews in Schottland. Boesch ist Ko-Direktor des Max-Planck-Instituts für Evolutionäre Anthropologie in Leipzig und hat eine Professur an der Universität Leipzig. Leitende Wissenschaftler der Feldforschungsprojekte, deren Ergebnisse in die hier vorgestellte Studie einflossen, sind: Jane Goodall (Jane Goodall Institute, Washington D.C.), William C. McGrew (Universität Miami), Toshisada Nishida (Universität Kyoto, Japan), Vernon Reynolds (Universität Oxford), Yukimaru Sugiyama (Tokaigakuen University, Japan), Caroline E.G. Tutin (Universität Stirling, Schottland), und Richard W. Wrangham (Harvard-Universität, Cambrigde, Massachusetts).*

Literaturhinweise

Chimpanzees of the Taï Forest: Behavioral Ecology and Evolution. Von Ch. Boesch und H. Boesch-Aschermann. Oxford University Press, 2000.

Primate Culture and Social Learning. Von A. Whiten in: Cognitive Science, Bd. 24, S. 477, 2000.

Cultures in Chimpanzees. Von A. Whiten et al. in: Nature, Bd. 399, S. 682, 1999.

Weblinks unter: ***www.wissenschaft-online.de/spektrum/***



BSE und das Prionen-Problem

Gängige BSE-Tests können zwar zeigen, ob geschlachtete Tiere an Rinderwahnsinn in fortgeschrittenem Stadium erkrankt waren. Sie sind aber nicht annähernd empfindlich genug, um festzustellen, ob ein Stück Fleisch beim Metzger wirklich unbedenklich ist. Diese letzte Sicherheit versprechen erst neue Tests, die auf tieferen Einsichten in Vermehrungsmechanismus und -geschwindigkeit von BSE-Erregern und anderen infektiösen Prionen beruhen.

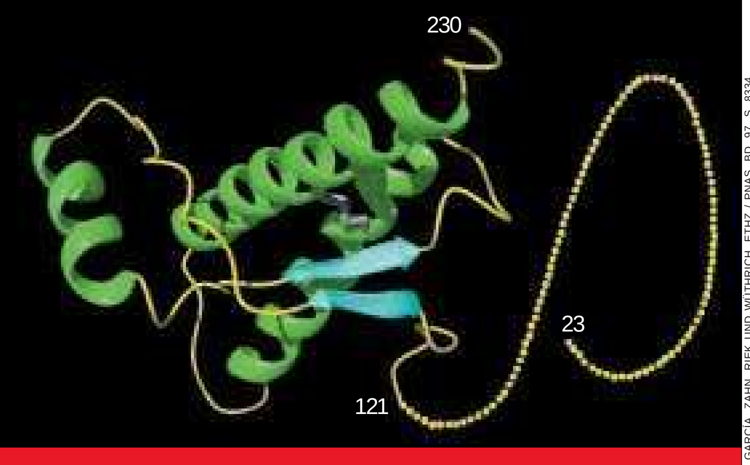
DAVID STOECKLEIN / THE STOCK MARKET



Von Manfred Eigen

Spätestens seit die ersten Fälle von Rinderwahnsinn in Deutschland aufgetaucht sind, ist auch die deutsche Bevölkerung beunruhigt bis alarmiert. Die drei Buchstaben BSE, Kürzel für die englische wissenschaftliche Bezeichnung *bovine spongiform encephalopathy*, zieren die Titelseiten großer Magazine. Sie bezeichnen die schwammartige (*spongiform*) Degeneration des Zentralnervensystems (*encephalopathy*), die bei betroffenen Rindern (*bovine*) im Endstadium auftritt.

Nach heutigem Kenntnisstand kann BSE auf den Menschen übertragen werden und nach einer Inkubationszeit von einem bis mehreren Jahren die neue Variante der Creutzfeldt-Jacob-Krankheit (vCJD) hervorrufen, die mit geistigem Verfall und Tod endet. (Die schon lange bekannte eigentliche Creutzfeldt-Jacob-Krankheit nimmt denselben Verlauf, ist aber nicht ansteckend, sondern entsteht mit einer extrem geringen Wahrscheinlichkeit spontan, also ohne äußere Einwirkung.)



STRUKTUR DES NORMALEN PRION-PROTEINS

Das natürliche Prion-Protein (PrP^{c}) des Rindes ist zwischen den Aminosäuren Nr. 121 und 230 in komplizierter Weise „gefaltet“, während der Rest des Moleküls (Aminosäuren Nr. 23–121) eine frei bewegliche Kette darstellt. Der gefaltete Bereich enthält drei schraubenförmig gewundene α-Helices (grün) und ein kurzes webstückartiges β-Faltblatt (blau). Dieser Teil des Moleküls nimmt bei der Umwandlung in die pathologische Form PrP^{sc} eine andere räumliche Struktur an.

Wie groß ist das Infektionsrisiko? Was kann man noch gefahrlos essen? Wie sicher sind die Tests? Wie lang ist die Inkubationszeit bei Rindern und Menschen? Definitive und genaue Antworten auf diese wichtigen Fragen, die in der Öffentlichkeit gestellt werden, lassen sich bisher nicht geben. Der Grund liegt in den Wissenslücken darüber, wie der Erreger des Rinderwahnsinns sich im Körper vermehrt und letztlich die Krankheitssymptome hervorruft. Für ein Verständnis der BSE-Seuche und ihrer Auswirkungen ist es deshalb unerlässlich, die Geschwindigkeiten der zu Grunde liegenden molekularen Prozesse – ihre Kinetik, wie die Chemiker sagen – exakt aufzuklären. Erst auf dieser Grundlage können wirksame Maßnahmen zur Eindämmung der Seuche gefunden werden.

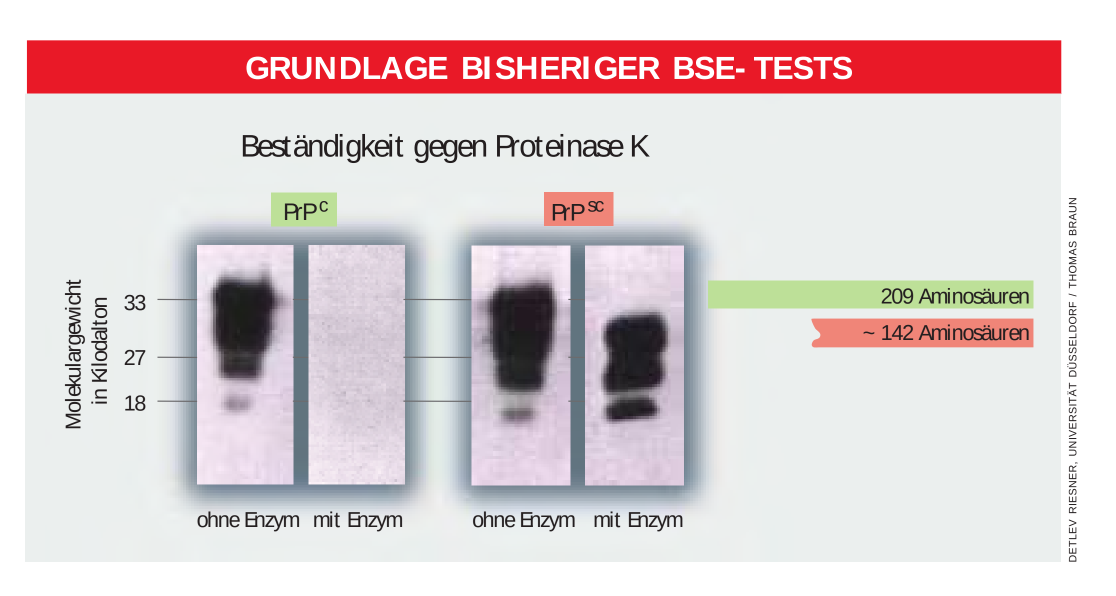
In einer Veröffentlichung mit dem Titel „Prionics“ hatte ich 1996 bereits analysiert, wie verschiedene Hypothesen über die Vermehrung des BSE-Erregers und anderer so genannter Prionen mit dem Erkrankungsverlauf und Erkenntnissen über die Ausbreitung der Seuche vereinbar sind. Neuere Ergebnisse bestätigen die Schlussfolgerungen aus meiner damaligen Arbeit. Aus ihr erwuchs inzwischen ein molekulares Modell, auf dessen Basis insbesondere ein neuer Test auf infektiöse Prionen entwickelt wurde, der die Erreger noch in zehn- bis hundertfach geringerer Konzentration nachweisen kann als heutige Standardmethoden. Damit ließe sich auch der Rinderwahnsinn in einem früheren Erkrankungsstadium bereits diagnostizieren. Doch bräuchte man noch um Größenordnungen empfindlichere Tests, um feststellen zu können, ob ein Stück Rindfleisch wirklich unbedenklich ist – ob es also garantiert weniger gefährliche Prionen enthält, als für eine Infektion nötig wären. Die neuen Einsichten in die Kinetik der Prionen-Vermehrung weisen zumindest den Weg zu solchen Nachweismethoden.

Was ist ein Prion?

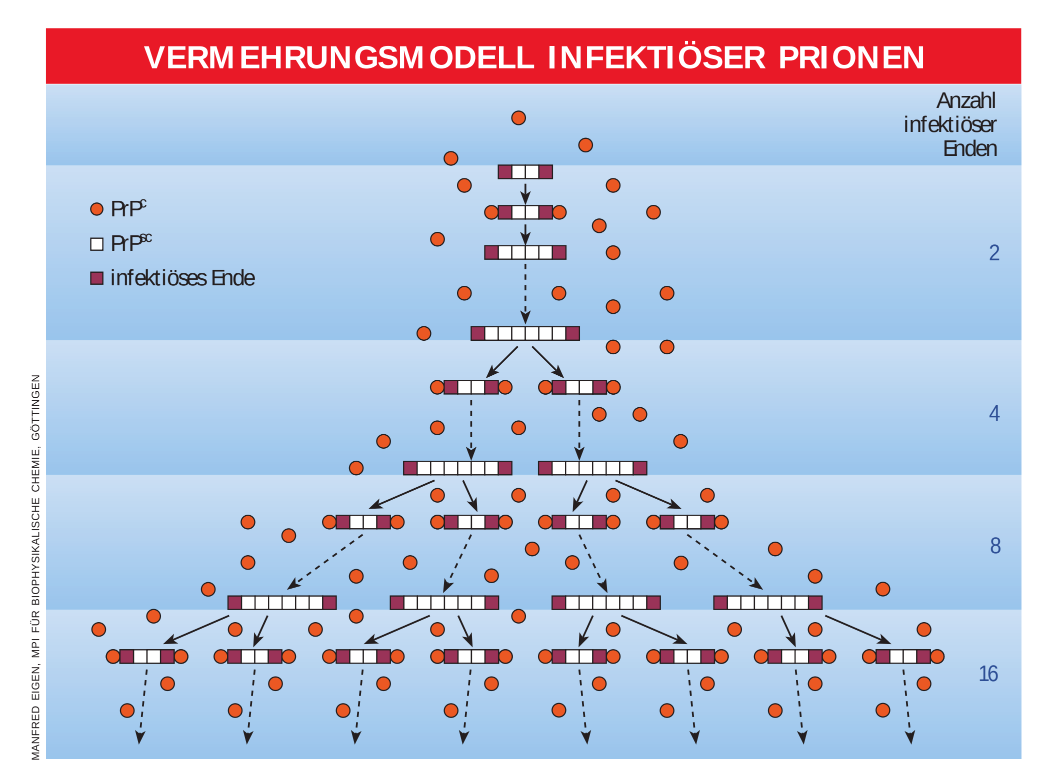
Stanley Prusiner von der Universität von Kalifornien in San Francisco gebührt das 1997 mit dem Chemie-Nobelpreis gewürdigte Verdienst, das infektiöse Agens von BSE und verwandten Erkrankungen als Protein erkannt zu haben (siehe seinen Artikel „Prionen“, Spektrum der Wissenschaft 12/84, S. 48). Er konnte zeigen, dass ein Eiweißstoff mit genau derselben Aminosäuresequenz in jedem gesunden Organismus vorkommt und dort eine bisher nicht bekannte Funktion erfüllt. Für beide prägte Prusiner den Begriff Prion. Heute spricht man von Prion-Protein (PrP) und charakterisiert die normale, zelluläre Form mit dem Suffix c (für englisch *cell* = Zelle). Das Suffix sc bezeichnet dagegen die pathologische, infektiöse Variante. Es nimmt Bezug auf die schon lange bei Schafen beobachtete, tödlich verlaufende Seuche „*scrapie*“ (Traberkrankheit), an der Prusiner Anfang der achtziger Jahre seine Untersuchungen vornahm (BSE war damals noch nicht bekannt). PrP^{c} und PrP^{sc} unterscheiden sich nur in ihrer räumlichen Struktur, das heißt in der Art und Weise, wie die Aminosäurekette gefaltet ist.

Ein einzelnes PrP^{sc} ist allerdings noch nicht ansteckend. Die „infektiöse Einheit“ – also die Mindestmenge, die eine Infektion auslösen kann – schließt vielmehr an die hunderttausend solche PrP^{sc}-Moleküle ein. Dies ließ sich durch Experimente ermitteln, in denen man Gruppen von Versuchstieren mit verschiedenen Mengen an PrP^{sc} beimpfte und dann beobachtete, wie viele der Tiere einer Gruppe nach welcher Zeit erkrankten.

Einen der überzeugendsten Belege für die Richtigkeit von Prusiners Vorstellungen über die Entstehung von Prionen-Erkrankungen lieferte Charles Weissmann und seine Schule an der Universität Zürich. Er wies (unter anderem) nach, dass in Mäusen, deren PrP-Gen ausgeschaltet wurde, sodass sie das zelluläre PrP^{c} nicht mehr herstellen können, eine Infektion mit PrP^{sc} wirkungslos bleibt.



Während das proteinspaltende Enzym Proteinase K das natürliche Prion PrP^{c} verdaut, kann es den überwiegenden Teil (von Position 90 bis 230) der pathologischen Form nicht abbauen. Hier ist eine Analyse – ein so genannter Western-Blot – von PrP^{c} (links) und PrP^{sc} (rechts) in unbehandeltem Zustand und nach der Zugabe von Proteinase K gezeigt. Wie man sieht, lässt das Enzym von dem normalen Protein nichts übrig; dagegen bleibt bei der pathologischen Form eine große Protein-Einheit bestehen, welche die Aminosäuren 90 bis 230 enthält. Darauf beruhen die heute verwendeten Nachweismethoden für den Rinderwahnsinn BSE.



MANFRED EIGEN, MPI FÜR BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE, GÖTTINGEN

Die infektiösen PrP^{Sc}-Ketten vermehren sich in zwei Schritten. Zunächst binden sie an ihren Enden körpereigene PrP^{C}-Moleküle und wandeln diese in die pathologische Form um. Im zweiten Schritt spalten sich die wachsenden Ketten (sodass ihre Länge im zeitlichen Mittel konstant bleibt). Während das Kettenwachstum die Anzahl der infektiösen PrP^{Sc}-Einheiten nicht erhöht, sorgt der Kettenbruch für ihre exponentielle Vermehrung. Der Vorgang ist in diesem Schema viel regelmäßiger dargestellt, als er tatsächlich abläuft.

Den quantitativen Beweis, dass Prionen im Einklang mit Prusiners Hypothese keine Erbsubstanz in Form von Nucleinsäuren enthalten, führte Detlev Riesner von der Universität Düsseldorf. Mit äußerst empfindlichen physikalisch-chemischen Messungen konnte er keinerlei RNA oder DNA im Erreger von Krankheiten wie BSE finden. Auf Grund der Nachweisgrenze von Riesners Verfahren lässt sich ausschließen, dass infektiöse PrP^{sc}-Einheiten mehr als ein Nucleinsäure-Molekül einer Länge von maximal 100 Nucleotiden enthalten; das ist in jedem Fall viel zu wenig, als dass darin das Prion-Protein verschlüsselt sein könnte.

Dies ist eine wichtige Feststellung; denn BSE und andere Prionen-Erkrankungen sind „infektiös“ in dem Sinne, dass sich der Verursacher exponentiell vermehrt. Alle solchen Infektionskrankheiten wurden bisher auf „reproduzierbare“ Erreger zurückgeführt, deren Basis die Verdopplung der Erbsubstanz RNA oder DNA ist. Bei den Prionen trifft dies offenbar nicht zu. Dennoch setzt ihre Entdeckung die Erkenntnisse der Virologie und Bakteriologie keineswegs außer Kraft. Sie zeigt lediglich, dass es auch nur aus Proteinen bestehende Systeme gibt, die das für Nucleinsäuren typische Replikations-Verhalten „simulieren“.

Einen weiteren Fortschritt brachte Kurt Wüthrich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Seine Arbeitsgruppe konnte mit Hilfe von Messungen der kernmagnetischen Resonanz (NMR) die Struktur der natürlichen Prionen ermitteln (Bild links oben). Demnach enthalten sie einen „globulären“ Bereich, in dem die Aminosäurekette drei schraubenartig gewundene (helikale) Strukturen bildet. Dieser Bereich kann ebenso wie der Rest des Moleküls durch ein proteinspaltendes Enzym „verdaut“ werden, während dies für einen analogen Abschnitt von PrP^{sc} nicht möglich ist. Das liegt wahrscheinlich daran, dass die pathologische Form weniger Helices und dafür mehr so genannte Beta-Faltblätter enthält, in denen die Aminosäurekette wie der Schussfaden in einem Webstück hin und her läuft und dabei eine wellblechartig geformte Struktur erzeugt. Hier gelingt es den Enzymen nur, einen Teil vom offenen Ende der Kette abzuspalten.

Dieses unterschiedliche Verhalten von PrP^{c} und PrP^{sc} bildet die Grundlage des heute gebräuchlichen Tests zum Nachweis von BSE (Bild links unten). Kurt Wüthrich hat ermittelt, wie stark die Prionen verschiedener Tierarten im globulären Strukturbereich voneinander abweichen, und daraus Schlüsse auf eine mögliche Übertragbarkeit der Krankheit zwischen unterschiedlichen Spezies gezogen. So haben zum Beispiel die Prion-Proteine von Rind und Mensch recht ähnliche räumliche Strukturen – was darauf hindeutet, dass die Seuche mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf die jeweils andere Art übertragen werden kann.

Stanley Prusiner schlug auch als erster einen Mechanismus für die Umwandlung von PrP^{c} in PrP^{sc} vor. Dabei nahm er an, dass sich ein einzelnes PrP^{sc}-Molekül an ein PrP^{c} anlagert und dieses dadurch veranlasst, gleichfalls die pathologische Form anzunehmen. Das entspräche der direkten Autokatalyse einer ▶

STECKBRIEF

Das Problem
Der BSE-Erreger hat eine äußerst lange Inkubationszeit. Erst Jahre nach der Infektion bricht der Rinderwahnsinn aus. Heutige BSE-Tests können frühestens sechs Monate vor dem Auftreten der ersten Symptome die Krankheit diagnostizieren. Auch davor ist ein infiziertes Rind aber wahrscheinlich schon ansteckend. Außerdem lassen sich heutige Tests nur an geschlachteten Tieren durchführen.

Kurzfristige Verbesserung
Ein neuartiges Nachweisverfahren, die so genannte Kreuzkorrelations-Fluoreszenz-Spektrometrie, ist zehn- bis hundertmal empfindlicher als die bisherigen Tests und im Prinzip auch an lebenden Rindern einsetzbar. Damit ließe sich die Erkrankung zumindest einige Monate früher entdecken.

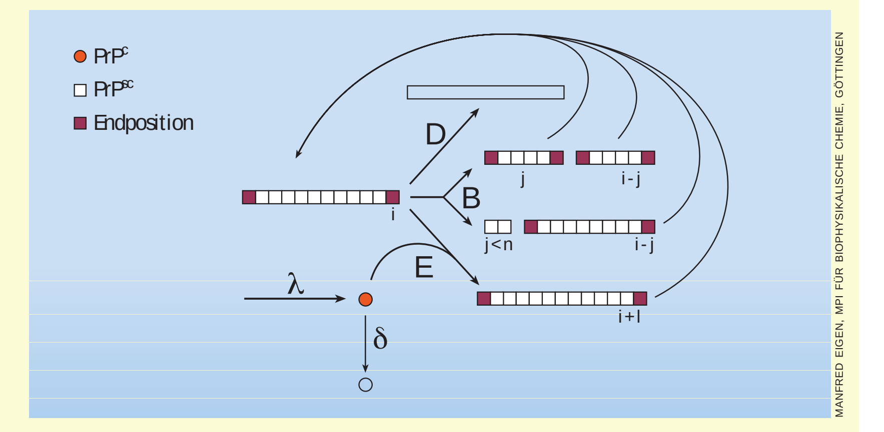
Langfristiger Lösungsansatz
Eine genaue Analyse des Vermehrungsmechanismus von Prionen zeigt Möglichkeiten auf, eine BSE-Infektion von Anfang an zu erkennen. Das Prinzip besteht darin, die infektiösen Partikel vor dem Nachweis im „Reagenzglas“ zu vermehren.

Strukturumwandlung: Das infektiöse Agens vermittelt (katalysiert) „eigenhändig“ die Konversion der harmlosen in die bösartige Form und sorgt so für seine eigene Vermehrung.

Dagegen postulierte Peter Lansbury vom Brigham and Women’s Hospital in Boston (Massachusetts) einen praktisch eindimensionalen Kettenwachstum-Mechanismus mit vorgelagerter Keimbildung. Demnach ähnelt die Vermehrung des pathologischen PrP^{sc} einer Polymerisation, wie sie bei der Herstellung von linearen Kunststoffen wie Polyethylen stattfindet: Eine Kette aus aneinander gereihten PrP^{sc}-Einheiten wächst, indem sie einzelne PrP^{c}-Moleküle anlagert, bindet und in die pathologische Form umwandelt. Keimbildung für die Kette bedeutet, dass sie erst eine kritische Größe erreicht haben muss, bevor sie schneller neue Einheiten anlagert als sie alte durch Abspaltung verliert. Mit diesem Modell suchte Lansbury vor allem zwei Tatsachen Rechnung zu tragen: dass das PrP^{sc} in den Hirnen der Opfer von Prionen-Erkrankungen gewöhnlich in Form von Stäbchen vorliegt und dass die „infektiöse Einheit“ eine große Zahl von PrP-Molekülen umfasst.

VERMEHRUNGSKINETIK

Um die Vermehrung infektiöser Prionen mathematisch nachvollziehen zu können, muss man sämtliche Reaktionen betrachten, die eine Kette aus falsch gefalteten PrP^{sc}-Molekülen der Länge i eingehen kann, und die zugehörigen Geschwindigkeiten abschätzen. Zu den möglichen Reaktionen gehört die Degradation (der Abbau) durch die Immunabwehr oder eine andere Form der Inaktivierung (D). Außerdem kann die Kette an beliebiger Stelle brechen (B). Nur Bruchstücke mit einer gewissen Mindestlänge n sind noch infektiös. Schließlich kann sich die Kette durch Anlagerung eines natürlichen PrP^{c}-Moleküls und seine Umwandlung in die pathologische Form verlängern (E). Natürliche PrP^{c}-Moleküle werden mit einer bestimmten Rate im Stoffwechsel zur Verfügung gestellt (λ) und abgebaut (δ).



MANFRED EIGEN, MPI FÜR BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE, GÖTTINGEN

Für all diese Umsetzungen gelten spezifische Geschwindigkeitskonstanten. Das Reaktionsschema liefert dann folgende Terme für die Geschwindigkeiten der Teilprozesse. Dabei bedeutet x die Konzentration an natürlichem PrP^{c}, y die Gesamtzahl der Ketten und z die Gesamtzahl der darin enthaltenen PrP^{sc}-Moleküle.

Reaktions-geschwindigkeit ($\dot{x} = dx/dt$)	Metabolismus λ/δ		Degradation D	Kettenbruch B	Elongation $E(x_0)$	terminale Abspaltung $n \leq 3$
$\dot{x}$ =	$+\lambda$	$-\delta x_0$			$-E(x_0)y$	$+n(n-1)By$
$\dot{y}$ =			$-Dy$	$+Bz$		$-(2n-1)By$
$\dot{z}$ =			$-Dz$		$+E(x_0)y$	$-(n-1)By$

MANFRED EIGEN

Diese Terme lassen sich zu Differenzialgleichungen für die zeitliche Änderung von y und z verbinden. Die Konzentration an natürlichen PrP^{c}-Molekülen kann im Fließgleichgewicht näherungsweise als konstant angenommen werden (x_0). Die Lösungen der Differenzialgleichungen lauten:

$$y(t) = A_2 e^{+k_2 t} + A_1 e^{-k_1 t} \qquad z(t) = B_2 e^{+k_2 t} + B_1 e^{-k_1 t}$$

Sie bestehen jeweils aus einem Wachstums- und einem Abklingterm. Letzterer hat eine negative Zeitkonstante ($-k_1$) und beschreibt die Einstellung eines Fließgleichgewichts mit konstanter Längenverteilung der Ketten. Nach einer gewissen Zeit dominiert der Wachstumsterm. Die Auswertung dieser Gleichungen zeigt, warum sich infektiöse Prionen nur extrem langsam vermehren.

Wie reagiert ein Prion?

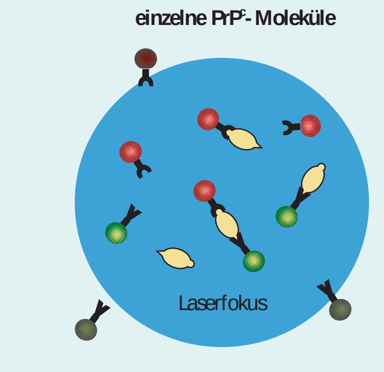
In meiner Untersuchung von 1996 ging es darum, die beiden Mechanismen auf der Grundlage der chemischen Kinetik gegeneinander abzuwägen. Dabei zeigte sich, dass ein Prusiner-Mechanismus mit nur zwei Prion-Einheiten im katalytischen Schritt nicht plausibel zu machen ist, wenn man realistische Werte für Geschwindigkeits- und Gleichgewichtskonstanten annimmt, wie wir sie für Protein-Protein-Wechselwirkungen kennen. Angewandt auf die spontan auftretende Creutzfeldt-Jacob-Krankheit beim Menschen hieße das: Die Bedingungen sind so kritisch, dass bei einem gegebenen Satz von Parametern die Konzentration von PrP^{sc} entweder kontinuierlich abnimmt oder aber stetig steigt. Es gälte das Prinzip „alles oder nichts“: Die Krankheit müsste entweder stets von selbst wieder erlöschen, bevor sie überhaupt richtig ausgebrochen ist, oder aber mit viel höherer Wahrscheinlichkeit spontan entstehen, als sie das tatsächlich tut.

Dieses Problem verschwindet, wenn eine kooperative Wechselwirkung zwischen mehr als zwei Protein-Einheiten auftritt. Etliche „allosterische“ Enzyme, die erst durch Anlagerung eines so genannten Effektor-Moleküls in eine wirksame Form umgewandelt werden, steuern ihre Aktivität auf diese Weise. Durch Kooperativität in der autokatalytischen Strukturumwandlung ergibt sich bei geeigneten kinetischen Parametern ein Schwellenwert für den Ausbruch der Krankheit.

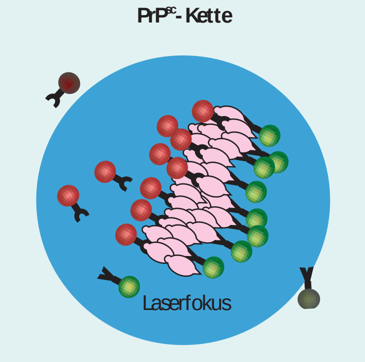
Tatsächlich beinhaltet der Lansbury-Mechanismus über die Keimbildung ebenfalls eine Art kooperative Wechselwirkung – in diesem Falle zwischen den Bausteinen der PrP^{sc}-Kette. Ein Baustein allein ist danach nicht fähig, ein PrP^{c}-Molekül festzuhalten und umzuwandeln. Damit die Umwandlung effizient geschieht, müssen mindestens so viele

MARKIERUNG MIT ZWEI FLUORESZENZFARBSTOFFEN

einzelne PrP^{c}-Moleküle



PrP^{sc}-Kette



 PrP^{c}-Molekül

 PrP^{sc}-Molekül

 Antikörper mit grünem Fluoreszenzfarbstoff

Antikörper mit rotem Fluoreszenzfarbstoff

Ein neuer, empfindlicherer Nachweis für pathologische Prionen beruht auf der so genannten SIFT-Methode (*Scanning for Intensely Fluorescent Targets*). Grundlage sind zwei verschiedene Arten von Antikörpern, die sich jeweils spezifisch an eine andere Stelle der PrP-Moleküle anlagern können. Sie tragen einen grünen oder roten Fluoreszenzfarbstoff als auffälliges „Etikett". Kommen diese fluoreszenzmarkierten Antikörper nun mit einem langkettigen PrP^{sc}-Teilchen zusammen, heften sie sich an vielen Stellen daran an (rechts). Das Teilchen verrät sich also dadurch, dass es bei Anregung mit entsprechendem Laserlicht intensiv in beiden Farben leuchtet. Normale PrP^{c}-Moleküle, die keine Ketten bilden, liefern dagegen nur schwache Lichtblitze (links).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / THOMAS BRAUN

Bausteine zusammenwirken, wie der kritische Keim enthält. Erst dann übertrifft die Geschwindigkeit für den Aufbau der Kette die für ihren Abbau.

Aber da bleibt noch eine Schwierigkeit. Zwar wächst die Kette, nachdem sie die Größe des kritischen Keims erreicht hat, autokatalytisch weiter. Aber es gibt keine exponentielle Beschleunigung, wie sie für autokatalytische Reaktionen typisch ist. Diese setzt voraus, dass nach der Umwandlung sowohl der ursprüngliche Katalysator als auch sein Reaktionsprodukt für weitere autokatalytische Zyklen zur Verfügung stehen, sodass sich die Anzahl der katalytisch wirksamen Spezies mit jedem Reaktionszyklus verdoppelt. Bei fortschreitender Polymerisation trifft das jedoch nicht zu; hier ist gleich bleibend nur jeweils die Proteineinheit am Kettenende katalytisch aktiv.

Doch auch für diese Schwierigkeit gibt es eine Lösung. Der Polymerisationsmechanismus liefert unter einer Bedingung gleichfalls exponentielles Wachstum: wenn die sich verlängernden Ketten immer wieder zerbrechen und damit neue Katalysatoren freisetzen. Martin Nowak – ein „Mitstreiter" aus der Frühzeit der theoretischen Erforschung molekularer Evolutionsprozesse in Göttingen und Wien (Arbeitsgruppe Peter Schuster), der jetzt am Institute for Advanced Study in Princeton tätig ist – hat den Gedanken des Kettenbruchs aufgegriffen und in ein verfeinertes Modell aufgenommen. Mit diesem Modell, das sich in eine mathematisch explizit lösbare Form überführen ließ, konnte Joanna Masel an der Universität Oxford in den letzten Jahren viele Details im Verlauf von Prionen-Erkrankungen erklären, die bislang nicht verständlich waren.

Vermehrungsmodell für den BSE-Erreger

Für sein Modell stellte Nowak zunächst Bilanzgleichungen für das Wachstum, den Bruch und den Abbau von Proteinketten aller möglichen Längen auf (siehe Kasten links). Das Wachstum wird im Wesentlichen durch einen Ausdruck für die Verlängerung der Ketten (Elongation) wiedergegeben. Wie die Elongation und der Kettenbruch zusammenwirken, sodass die Anzahl der katalytisch wirksamen Kettenenden exponentiell zunimmt, ist im Bild auf Seite 43 an einem Modellstrang schematisch gezeigt. Der Abbau, dem alle Polymere unterliegen, sorgt dafür, dass die infektiösen Keime nur eine begrenzte Lebensdauer haben.

Die Elongationsgeschwindigkeit setzt sich aus drei Komponenten zusammen. Sie beschreiben drei teilweise konkurrierende Prozesse:

- die Anlagerung einer Protein-Einheit PrP^{c} an eine der beiden (oder an beide) Endpositionen der PrP^{sc}-Kette; ihre Geschwindigkeit ist durch die Begegnungshäufigkeit der Reaktionspartner auf Grund ihrer Diffusionsbewegung begrenzt;
- die Ablösung der in ihrer Struktur noch nicht umgewandelten PrP^{c}-Einheit;
- die Strukturumwandlung des PrP^{c} in das PrP^{sc}, die für den stabilen Einbau in die Kette sorgt und damit den Elongationsschritt abschließt.

Die Geschwindigkeiten dieser drei Prozesse lassen sich (nach dem Vorbild der Enzymkinetik) in einem einzigen mathematischen Ausdruck zusammenfassen.

Statt nun für jede einzelne PrP^{sc}-Kette gesonderte Bilanzgleichungen aufzustellen, benutzte Nowak zwei Summenterme, die ich 1996 eingeführt hatte. Der eine beinhaltet die gesamte Menge von PrP-Einheiten, die in den verschieden langen Polymerketten enthalten sind; der andere ist ein Maß für die Anzahl dieser Ketten und damit aller katalytisch wirksamen Endpositionen.

Der Vorteil des Aufsummierens liegt darin, dass sich dabei viele Ausdrücke aus den individuellen Gleichungen kompensieren. So bleiben nur zwei lineare Differenzialgleichungen übrig, welche die Änderung der zwei genannten Summenterme mit der Zeit beschreiben. Sie lassen sich analytisch explizit lösen. Die Lösungen bestehen aus der Summe zweier Exponentialfunktionen, in denen die Zeit einmal mit positivem und einmal mit negativem Vorzeichen als Exponent auftritt (siehe Kasten links).

Literaturhinweise

Molekulare Diagnostik. Von Manfred Eigen in: Das Gen und der Mensch (Hg. G. Gottschalk). Wallstein Verlag, 2000

Ultra-sensitive Detection of Pathological Prion Protein Aggregates by Dual-color Scanning for Intensely Fluorescent Targets (SIFT). Von J. Bieschke et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences (USA), Bd. 97, S. 5468 (2000)

Quantifying the Kinetic Parameters of Prion Replication. Von J. Masel, V. A. A. Jansen und M. A. Nowak in: Biophysical Chemistry, Bd. 77, S. 139 (1999)

Prionics. Von Manfred Eigen in: Biophysical Chemistry, Bd. 63, S. A1 (1996)

Die eine Funktion repräsentiert einen Wachstums-, die andere einen Abklingterm. Letzterer beschreibt die Einstellung eines Fließgleichgewichts, in dem eine bestimmte Längenverteilung der Ketten mit definiertem Mittelwert stationär aufrechterhalten wird. Nach einer gewissen Zeit liefert er keinen nennenswerten Beitrag mehr, sodass nur noch der Wachstumsterm wirksam bleibt. Dann steigt sowohl die Anzahl der Polymerketten als auch die der darin enthaltenen PrP^{sc}-Einheiten exponentiell an, bis schließlich der Nachschub an PrP^{c}-Molekülen versiegt.

Die Ursache der langen Inkubationszeit

Joanna Masel hat in ihrer letztes Jahr in Oxford vorgelegten Dissertation dieses Modell im Detail weiterentwickelt sowie alle Folgerungen ausführlich untersucht und mit experimentellen Daten verglichen. Ihre Ergebnisse haben große Bedeutung für die laufenden Bemühungen, Prionen-Erkrankungen noch früher nachzuweisen, als das heute schon möglich ist. Der Vergleich mit gemessenen Daten legt nahe, dass eine Anlagerung von PrP^{c} an eine Kette von PrP^{sc} und seine Umwandlung in ein (bösartiges) PrP^{sc} rund eine Viertelstunde dauert. Die stationäre Kette von PrP^{sc} hat eine mittlere Länge von etwa tausend Einheiten. Sie braucht für ihre Bildung demnach eine tausendmal längere Zeit. Die Experimente ergeben Werte zwischen fünf und zwanzig Tagen. Damit sich ein Fließgleichgewicht mit stationärer Kettenlänge einstellen kann, muss innerhalb dieser Zeitspanne im Mittel ein Kettenbruch erfolgen. Die Halbwertszeit für den Bruch an einer vorgegebenen Stelle beträgt rund dreißig Jahre. Da jede Kette im Mittel etwa tausend mögliche Bruchstellen enthält, findet im Gesamtaggregat etwa alle zehn Tage ein Kettenbruch statt. Kettenaufbau und Bruch halten sich so die Waage; dabei steigt jedoch die Zahl der Ketten (und damit der aktiven Kettenenden) exponentiell an.

Eine wichtige Größe ist auch das Verhältnis von Aufbau- und Eliminationsgeschwindigkeit der PrP^{sc}-Ketten. Nach Messungen an Versuchstieren haben beide etwa die gleiche Größenordnung. Das bedeutet, dass das infektiöse Material sich ständig reproduzieren muss, um als solches zu überleben. Die Ursache der Elimination ist nicht genau bekannt; vielleicht spielt die Immunabwehr eine Rolle, es könnte aber auch andere Prozesse geben, welche die PrP^{sc}-Ketten abbauen oder inaktivieren. Deshalb wurde der Eliminationsgeschwindigkeit nur durch einen unspezifischen Abbauterm Rechnung getragen, der zur Menge des vorhandenen infektiösen Materials proportional ist. Die Abschätzungen von Reaktionszeiten beeinträchtigt das jedoch kaum.

Ein wichtiger Punkt ist noch, dass sich nur das Substrat der Reaktion, das umzuwandelnde PrP^{c}, frei in Lösung bewegen kann und auf diese Weise leicht zu einer wachsenden PrP^{sc}-Kette gelangt (was das Bild „diffusionskontrollierter“ schneller Reaktionen rechtfertigt). Die PrP^{sc}-Ketten selbst sind dagegen überwiegend an Membranen gebunden. Das mag auch erklären, warum die „infektiöse Einheit“ rund 100 000 einzelne Prion-Moleküle umfasst, obwohl die Ketten im Mittel schon bei einer Länge von tausend brechen. Die Bruchstücke bleiben in der Nähe und wirken damit wie kooperative Schwärme. Erst wenn sie sich von der Membran lösen, können sie sich weiträumig ausbreiten.

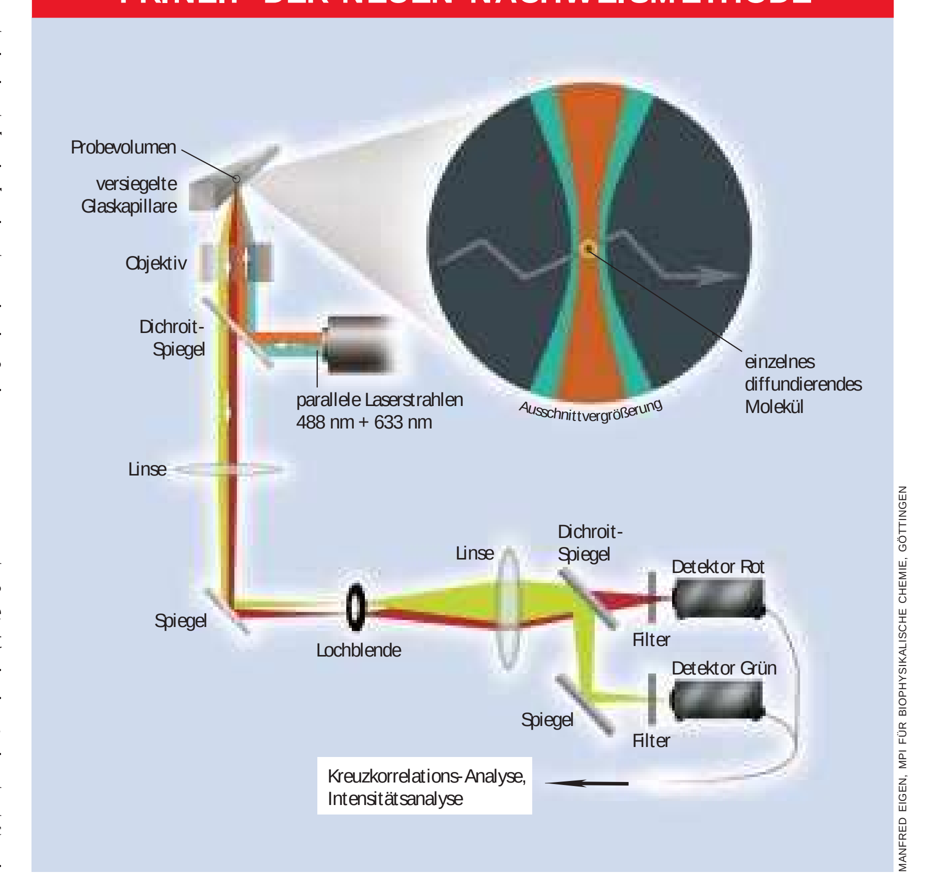
Das wesentliche Ergebnis der Untersuchungen von Masel besteht darin, dass eine Verdoppelung des vorhandenen Materials bereits Wochen erfordert. Die Vermehrung eines infektiösen Keims bis zu einer Konzentration, in der er analytisch erfassbar ist, braucht Zeiten von der Größenordnung eines Jahres.

Viele Fragen bleiben bei diesen Betrachtungen zwangsläufig ausgeklammert, etwa nach der Anfangs- und Endphase der Infektion, nach den Infektionswegen, nach der Zeit, die bis zum Befall von Hirn und Rückenmark verstreicht, sowie nach der Art der dort in der Endphase angerichteten Zerstörungen. Dies aufzuklären ist jedoch vor allem Sache der Neuropathologen.

Ein empfindlicher Test zur BSE-Früherkennung

Die Kenntnis der kinetischen Grundlagen der Infektion ist entscheidend für die Frage, wie früh sich die Erkrankung feststellen lässt. Eine möglichst frühe Diagnose wiederum bildet eine wichtige Voraussetzung für die wirkungsvolle Bekämpfung der Seuche.

PRINZIP DER NEUEN NACHWEISMETHODE



Bei der SIFT-Methode werden die Strahlen eines Argon- und eines Helium-Neon-Lasers auf einen gemeinsamen Punkt in der Messlösung fokussiert. Wann immer ein mit einem grünen oder roten Fluoreszenzfarbstoff markiertes Teilchen in diesen Brennpunkt gerät, sendet es Licht in der jeweiligen Farbe aus. Dieses wird gesammelt und in die roten und grünen Anteile aufgespalten. Das gleichzeitige Auftreten von roter und grüner Fluoreszenz zeigt ein Prion an.

Wegen der äußerst langsamen Vermehrung der pathologischen Prionen erlaubt ein empfindlicheres Nachweisverfahren zugleich, die Erkrankung um Monate bis Jahre früher zu erkennen. Im Jahre 1994 haben meine Mitarbeiter und ich eine Methode beschrieben, die ideal auf die Identifizierung kleinster Mengen von Prionen zugeschnitten ist. Sie knüpft an eine Idee an, die Rudolf Rigler bereits während eines Gastaufenthalts am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen zwischen 1968 und 1971 konzipiert und dann am Karolinska-Institut in Stockholm zur Anwendungsreife weiterentwickelt hat; zwischen 1991 und 1992 war er als Alexander-von-Humboldt-Preisträger noch einmal für ein Jahr in Göttingen.

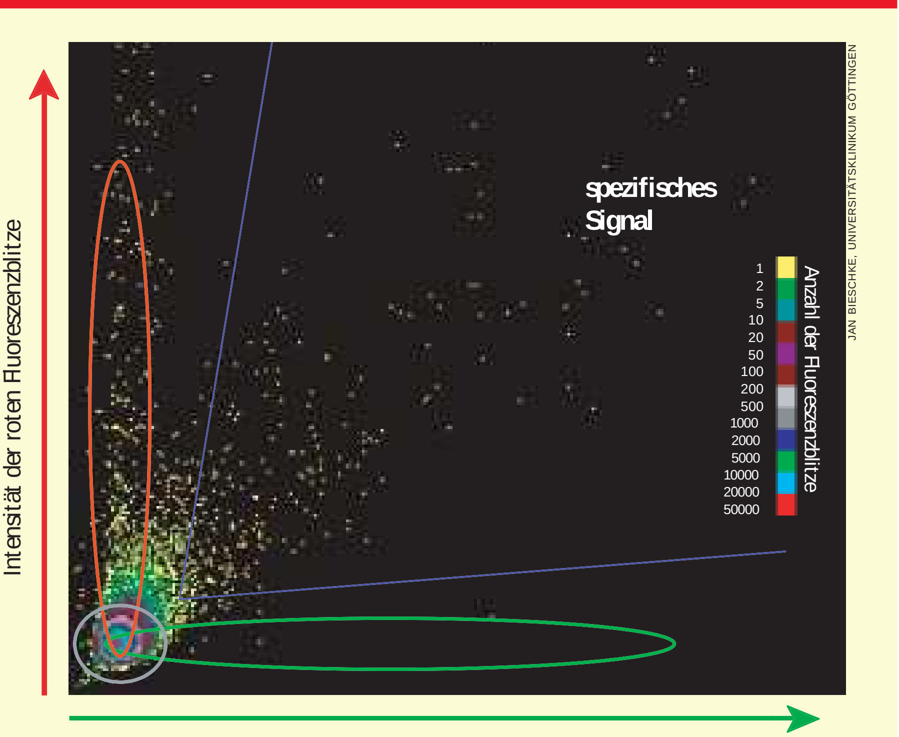
Es handelt sich um die so genannte FCS-Methode (Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie). Sie stellt das Prinzip der klassischen Fluoreszenzspektroskopie sozusagen auf den Kopf. Bei dieser sind die nachzuweisenden Moleküle mit einem Farbstoff markiert, der bei Beleuchtung bei einer charakteristischen Wellenlänge fluoresziert. Die gesamte Probe wird bestrahlt und die Intensität des Fluoreszenzlichtes gemessen; sie zeigt die Konzentration des gesuchten fluoreszierenden Moleküls an. Diese muss dabei allerdings so groß sein, dass sich das kontinuierlich gemessene Fluoreszenzsignal noch deutlich vom Rauschhintergrund abhebt, den gestreute und reflektierte Lichtquanten verursachen. Das erfordert Konzentrationen oberhalb des nanomolaren Bereiches, also oberhalb von 10^{15} (einer Billiarde) Teilchen pro Liter.

Bei der neuen Methode genügen dagegen weit niedrigere Konzentrationen. Der Trick besteht darin, nicht mehr das gesamte Probenvolumen zu beleuchten. Stattdessen wird ein Laserstrahl auf ein möglichst kleines (durch die endliche Lichtwellenlänge begrenztes) Raumelement gebündelt. In unserem Falle beträgt das Volumen des Laserfokus weniger als ein Femtoliter (10^{-15} Liter). Das bringt den Vorteil, dass von einem so kleinen Raumelement nur wenig Streulicht ausgeht und damit der Rauschhintergrund praktisch nicht stört. Scheinbarer Nachteil ist, dass in diesem winzigen Volumen im Allgemeinen auch kein einziges fluoreszierendes Molekül mehr anzutreffen ist. Damit würde sich im Zeitmittel gleichfalls nur ein minimales Fluoreszenzsignal ergeben, das sich vom Rauschen nicht mehr abhebt.

Aber dies ist eben nur ein scheinbarer Nachteil. Denn wir registrieren nun nicht mehr das zeitgemittelte stationäre Signal, sondern „legen uns auf die Lauer“ und warten, bis eines der fluoreszierenden Moleküle in den Laserfokus eintritt. Es hält sich dort nur für einige Millisekunden oder weniger auf; aber in dieser Zeit sendet es eine „Salve“ von einigen tausend Fluoreszenzlichtquanten aus. Diese werden mit einer Methode nachgewiesen, die der geschilderten Situation besonders angepasst und unter der Bezeichnung Autokorrelation bekannt ist. Man multipliziert dazu einfach die in zwei unmittelbar aufeinander folgenden Zeitintervallen aufgenommenen Intensitäten. Das Produkt ist nur dann von null verschieden, wenn beide Intensitäten ungleich null sind. Das trifft für eine „Salve von Lichtquanten“ zu, im Allgemeinen aber nicht für den aus einzelnen Störsignalen bestehenden Rauschhintergrund. Dadurch hebt sich bei zeitaufgelöster Registrierung die Summe der Intensitätsprodukte für die gesamte Aufenthaltsdauer des Moleküls im Laserfokus deutlich vom Rauschhintergrund ab.

Die Apparatur besteht im Wesentlichen aus einem hochempfindlichen konfokalen Fluoreszenzmikroskop mit computergesteuerter Auswertung der autokorrelierten Signale (Bild links). Diese Methode gestattet nicht nur, einzelne Moleküle sichtbar zu machen, sondern ermöglicht auch den empfindlichen Nachweis kleinster Konzentrationen –

ERGEBNISSE VON EICHTESTS



Um die Eignung der SIFT-Methode zum Nachweis pathologischer Prionen beim Menschen zu testen, wurde Rückenmarksflüssigkeit von Patienten, die an einer neurologischen Störung, nicht aber an einer Prionen-Krankheit litten, mit einer bestimmten Menge infektiöser Prion-Aggregate versetzt. Die anschließende Messung mit dem SIFT-Verfahren unter Einsatz von Antikörpern mit roter oder grüner Fluoreszenzmarkierung lieferte das hier dargestellte Ergebnis. Gezeigt ist in farbiger Codierung (siehe Skala) die Anzahl der registrierten Lichtblitze während der Messdauer in Abhängigkeit von ihrer Intensität. Am häufigsten sind schwache Signale durch fluoreszenzmarkierte Antikörper, die allein oder an ein PrP^{C}-Molekül gekoppelt in den Laserfokus geraten (links unten). Tritt dagegen ein PrP^{Sc}-Agglomerat, das mit vielen grün und rot Fluoreszenzmarkern besetzt ist, in das Messvolumen, gibt es einen intensiven Lichtblitz, der aus etwa gleich vielen grünen wie roten Anteilen besteht. Solche Ereignisse erscheinen als gelbe Punkte in dem Bereich rechts oben, der durch die beiden blauen Linien abgegrenzt ist. Punkte innerhalb der roten oder grünen Ellipse stammen von anderen Proteinaggregaten, die zufällig einen der Fluoreszenzmarker binden.

bis hinab in den femtomolaren Bereich, was rund einer Milliarde Teilchen pro Liter entspricht, und bei Anwendung einiger Tricks sogar noch darunter.

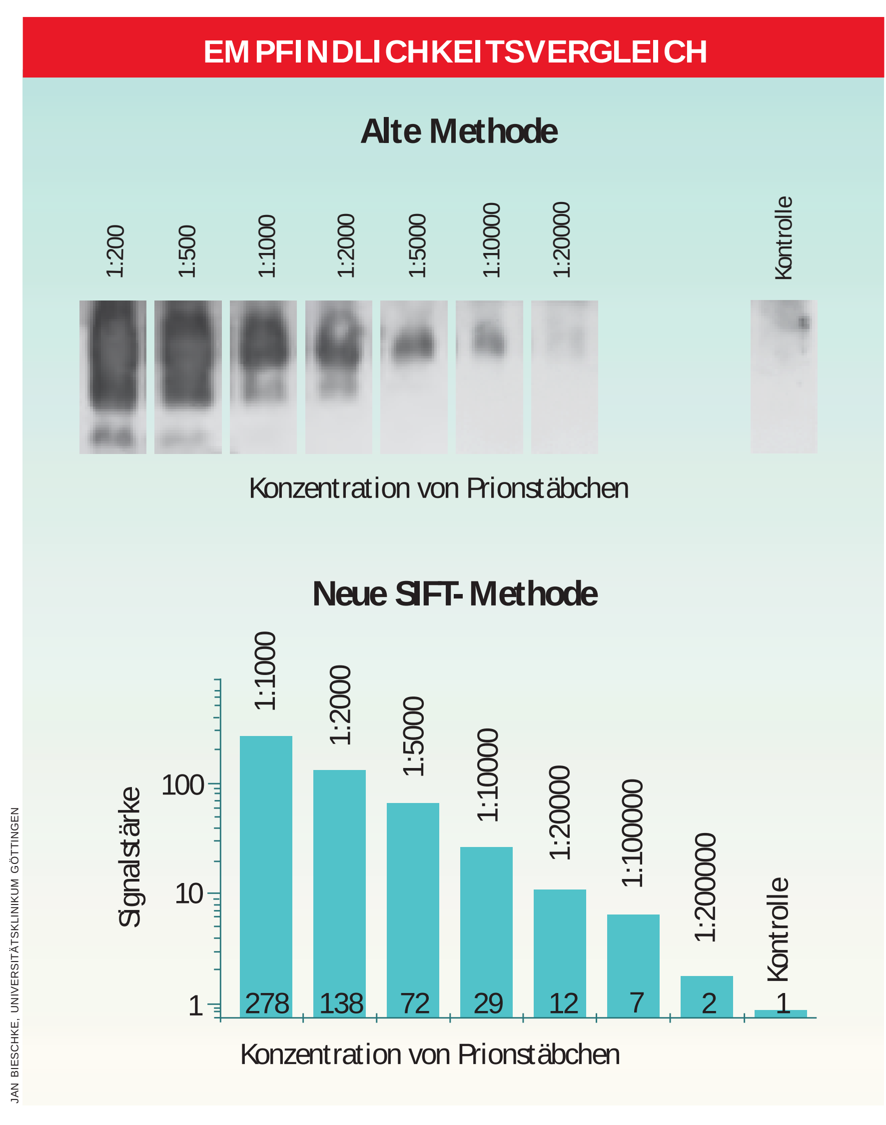
Die Autokorrelationsmethode arbeitet mit einem Fluoreszenzmarker, der an einer Substanz befestigt ist, die sich mit hoher Affinität an den nachzuweisenden Stoff anlagert und ihn so quasi mit einem leuchtenden Etikett versieht. Als solche Etiketten eignen sich vor allem monoklonale Antikörper, die sich spezifisch an Epitope (Abschnitte aus wenigen Aminosäuren) des PrP-Moleküls heften. Nun ist PrP^{sc} ein relativ großes Protein-Aggregat, das viele PrP-Moleküle enthält und damit Platz genug zum Anheften vieler – auch unterschiedlicher – Etiketten bietet.

Das ermöglicht einen weiteren Trick, der die Nachweisempfindlichkeit noch steigert. Statt eines einzelnen monoklonalen Antikörpers benutzt man zwei, die sich gegen verschiedene Epitope der PrP-Moleküle richten und mit zwei unterschiedlichen Fluoreszenzfarbstoffen markiert sind – der eine zum Beispiel mit einem roten und der andere mit einem grünen (Bild auf Seite 45). Zudem ersetzt man die Autokorrelation durch eine Kreuzkorrelation. Sobald nämlich ein PrP^{sc}-Aggregat in den Laserfokus gerät, tritt gleichzeitig ein starkes rotes und ein intensives grünes Signal auf. Ihre Koinzidenz ist ein eindeutiger Hinweis auf die Anwesenheit des infektiösen Prions. Irgendein anderes Einweißmolekül könnte vielleicht zufällig einen der beiden Antikörper anlagern, sodass entweder nur ein rotes oder nur ein grünes Signal erschiene, aber dass beide Marker gleichzeitig von einer falschen Zielstruktur gebunden werden, ist sehr unwahrscheinlich. Andererseits kann zwar ein normales PrP^{c}-Molekül auch je einen roten und einen grünen Marker binden; da es aber nicht zu großen Aggregaten verklumpt, liefert es nur ein schwaches Signal.

In seiner Dissertation hat mein Mitarbeiter Jan Bieschke in Kooperation mit Armin Giese aus der Arbeitsgruppe von Hans Kretzschmar am Göttinger Universitätsklinikum (inzwischen an der Universität München) diese Kreuzkorrelation zu einer effektiven Methode der molekularen Diagnostik ausgearbeitet, die wir mit dem Kürzel SIFT (*Scanning for Intensely Fluorescent Targets*) bezeichnen. Mit ihr wurde die Rückenmarksflüssigkeit (der Spinalliquor) von Patienten untersucht, die an der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit leiden.

Die Empfindlichkeit dieses Verfahrens übersteigt die des klassischen Nachweises für BSE wie der Western-Blot-Methode um das Zehn- bis Hundertfache. Das Kreuzkorrelationssignal ließ sich noch bis zu einer Verdünnung um den Faktor 250 000 beobachten (Bild links). Das entspricht einer Konzentration von Aggregaten von pico- bis femtomolar, also von einer Billion bis hinab zu einer Milliarde Teilchen pro Liter. Messungen dieser Art waren sowohl bei Creutzfeldt-Jacob- als auch bei Alzheimer-Patienten erfolgreich (Bild rechts); Letztere leiden unter einer schweren Form von Altersschwachsinn, der gleichfalls durch das Auftreten von Proteinaggregaten charakterisiert ist – in diesem Falle handelt es sich allerdings nicht um Prionen, sondern um nicht infektiöse Beta-Amyloide.

Der Vorteil des SIFT-Verfahrens liegt – abgesehen von seiner hohen Empfindlichkeit – vor allem darin, dass es erstmals quantitative Messungen an zugänglichen Körperflüssigkeiten (wie dem Spinalliquor) gestattet. Damit wären auch BSE-Tests am lebenden Rind im Prinzip möglich. Allerdings dürfte die Entnahme von Rückenmarksflüssigkeit in diesem Falle eine komplizierte Prozedur sein, die eventuell eine Betäubung erfordert.

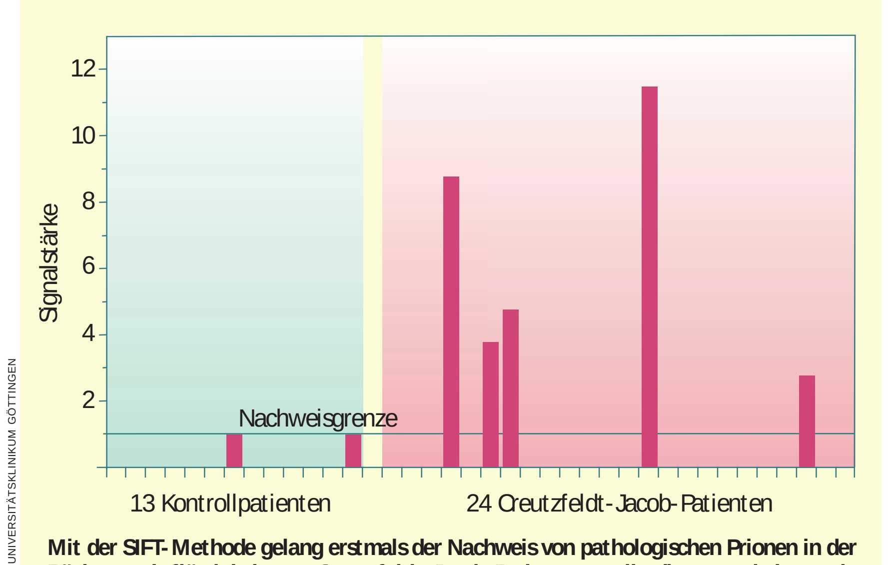


Verdünnungsreihen mit stäbchenförmigen Prion-Aggregaten in Rückenmarksflüssigkeit wurden sowohl nach dem herkömmlichen Verfahren als auch mit der neuen SIFT-Methode analysiert. Wie man sieht, lassen sich mit der SIFT-Methode noch erheblich geringere Konzentrationen nachweisen.

Gute Aussichten auf wirkliche Sicherheit für den Verbraucher

Was den Nachweis von BSE-Erregern in Rindern angeht, sind die Anforderungen allerdings extrem hoch. Es genügt nicht festzustellen, dass die Konzentration der pathologischen Prionen unterhalb der Nachweisgrenze eines bestimmten Testverfahrens liegt. Vielmehr muss sichergestellt sein, dass das Fleisch völlig frei

PRION-NACHWEIS IN RÜCKENMARKSFLÜSSIGKEIT



Mit der SIFT-Methode gelang erstmals der Nachweis von pathologischen Prionen in der Rückenmarksflüssigkeit von Creutzfeldt-Jacob-Patienten – allerdings nur bei gut einem Viertel der Fälle. Der Grund für diese relativ geringe Sensitivität ist noch unklar. Immerhin lieferte keiner der Kontrollpatienten ein falsch positives Resultat.

JAN BIESCHKE, UNIVERSITÄTSKLINIKUM GÖTTINGEN

von infektiösem Material ist. Schließlich wird man kaum Lebensmittel auf den Markt bringen können, die möglicherweise noch Krankheitskeime enthalten; sonst müsste bald jedes Rindersteak mit dem Vermerk gekennzeichnet sein: „Die EU-Gesundheitsminister: Der Verzehr von Rindfleisch ist lebensgefährlich“. Damit komme ich zu der noch ungelösten Problematik.

Zwar sprechen alle bisher bekannten Nachweisverfahren bereits bei Konzentrationen von pico- bis nanomolar an, was für eine chemische Analyse schon eine äußerst hohe Empfindlichkeit ist. Dem entsprechen pro Kilogramm Substanz aber immer noch etwa eine Billion bis Billiarde molekulare Einheiten – also Mengen, die weit oberhalb jener 100 000 PrP^{sc}-Einheiten liegen, die ein infektiöser Keim enthält. Da hilft es auch nichts, dass unsere neuen Verfahren um ein bis zwei Größenordnungen empfindlicher sind als die bisherigen Standardmethoden. Wir können zwar einzelne Moleküle „sehen“, aber wir müssen sie erst einmal innerhalb der riesigen Menge an körpereigenen Teilchen „aufstöbern“.

Die Lösung wäre, möglicherweise vorhandene Keime künstlich zu vermehren, bis ihre Konzentration die Nachweisgrenze übersteigt. Bei Viren und Bakterien, deren „pathologische Potenz“ in ihren Genen, also den Erbmolekülen RNA (Ribonucleinsäure) oder DNA (Desoxyribonucleinsäure), gespeichert wird, ist das heutzutage kein Problem. Mit Hilfe der Polymerase-Kettenreaktion (PCR), deren Entdecker Karry B. Mullis dafür 1993 den Chemie-Nobelpreis erhielt, oder mit ähnlichen Verfahren, die auf der Replikation von RNA oder DNA basieren, lassen sich einzelne Moleküle exponentiell binnen kurzer Frist so weit vermehren, dass sie gebräuchlichen Analyseverfahren zugänglich sind.

Hier nun kommt die Kinetik der Vermehrung ins Spiel. Bei RNA und DNA lässt sich eine Verdoppelung charakteristischer Sequenzen im Sekunden- bis Minutentakt erreichen. Somit kann man in einer Probe, die nur eine einzige DNA-Zielsequenz enthält, binnen einer halben Stunde 30 Verdopplungen vornehmen und damit 2^{30} oder rund eine Milliarde Kopien herstellen. Selbst wenn es für Prionen eine analoge Methode gäbe, würde eine solche Vermehrung auf Grund der oben beschriebenen Kinetik jeweils eine Zeit von der Größenordnung eines Jahres in Anspruch nehmen – es sei denn, man findet einen Weg, diese Reaktionen *in vitro* erheblich zu beschleunigen. Das liegt nach meiner Kenntnis des Reaktionsmechanismus durchaus im Bereich des Möglichen. Dabei lässt sich ausnutzen, dass die Aggregate hydrophob, also wassermeidend, sind und sich daher bevorzugt an Membranen anlagern. Und hier komme ich auf eine Aussage am Anfang des Artikels zurück: Die Lösung des BSE-Problems – falls es eine solche denn geben sollte – liegt in der sachgerechten Anwendung unserer Kenntnisse vom Mechanismus und der Kinetik der Prionen-Vermehrung.

Die Bestrebungen müssen dahin gehen, die Kinetik so zu beeinflussen, dass sich winzige Spuren des Erregers im Reagenzglas in kurzer Zeit zu nachweisbaren Mengen vervielfältigen lassen. Nur so kann es gelingen, eine Infektion schon im Anfangsstadium zu entdecken.

Auch die Frage, was ein Prion ist, erscheint nach den hier vorgestellten Überlegungen in einem neuen Licht. Das infektiöse Agens ist weder ein einzelnes isoliertes Proteinmolekül PrP^{sc} noch ein definiertes Polymer von Protein-Einheiten. Vielmehr handelt es sich um eine Verteilung von – im Wesentlichen – eindimensionalen Protein-Aggregaten, die sich aus PrP^{sc}-Molekülen zusammensetzen und durch einen definierten stationären Mittelwert der Kettenlängen charakterisiert sind. Die Größe der infektiösen Einheit hängt dabei nicht nur von der durchschnittlichen Kettenlänge ab. Vielmehr sind die Aggregate vermutlich an Membranen gebunden und treten demnach gewöhnlich als Verband in Erscheinung. Dieser stellt die kleinstmögliche Infektionsquelle dar.

Ansteckend sind lediglich die Endglieder der jeweiligen Ketten. Somit spielt für die Infektiosität auch eine maßgebliche Rolle, welche Zusammensetzung die Komponenten der Verteilung haben: Eine einzelne lange Kette von hunderttausend PrP^{sc}-Einheiten ist nur ein tausendstel so ansteckend wie die gleiche Menge von PrP^{sc}-Einheiten, die sich auf tausend Kettenstücke einer mittleren Länge von hundert verteilen. Die Zahl der „infektiösen“ Ketten-Endglieder ist es, die ein exponentielles Wachstum aufrecht erhält. ■

***Manfred Eigen** ist emeritierter Direktor der Abteilung für Biochemische Kinetik am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen. Für die Erfindung bahnbrechender Methoden zur Bestimmung der Geschwindigkeit schneller chemischer Reaktionen erhielt er 1967 den Chemie-Nobelpreis. Später hat sich sein Arbeitsschwerpunkt auf die molekulare Evolution und ihre informationstheoretischen Grundlagen sowie ihre Anwendungen in der Biotechnologie verlagert. Zusammen mit Rudolf Rigler vom Karolinska-Institut in Stockholm entwickelte er vor einigen Jahren die Korrelations-Fluoreszenz-Spektrometrie, mit der sich einzelne Moleküle nachweisen lassen.*

SERIE KOSMOLOGIE (TEIL II)

Der Nachhall des Urknalls

Winzige Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung könnten Spuren von Gravitationswellen sein, die das Universum kurz nach dem Urknall erschütterten. In naher Zukunft sollen speziell dafür konstruierte Satelliten-Sonden nach solchen Spuren suchen.

Von Robert R. Caldwell und Marc Kamionkowski

Die Kosmologen stellen heute immer noch dieselben Fragen, die bereits die ersten Beobachter des Himmels in der Antike aufwarfen: Woher stammt das Universum? Was – wenn überhaupt – gab es vor seinem Beginn? Wie erlangte das Universum seinen gegenwärtigen Zustand? Wie sieht seine Zukunft aus?

Obwohl Theoretiker lange über den Ursprung des Weltalls nachgedacht haben, war ihnen bis vor kurzem jede Möglichkeit verschlossen, die ersten Augenblicke des Universums direkt zu untersuchen und so ihre Hypothesen zu testen. In den vergangenen Jahren stießen Forscher jedoch auf eine Methode, das Universum so zu beobachten, wie es in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall war. Die Suche gilt dabei bestimmten Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Bei dieser Strahlung handelt es sich um ein elektromagnetisches „Echo" aus der heißen Phase des frühen Kosmos; seit fast 15 Milliarden Jahren durchdringt es das Universum, inzwischen in stark abgekühlter Form. Da sie im Bereich der Mikrowellen am stärksten auftritt, sprechen Forscher oft auch von der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung.

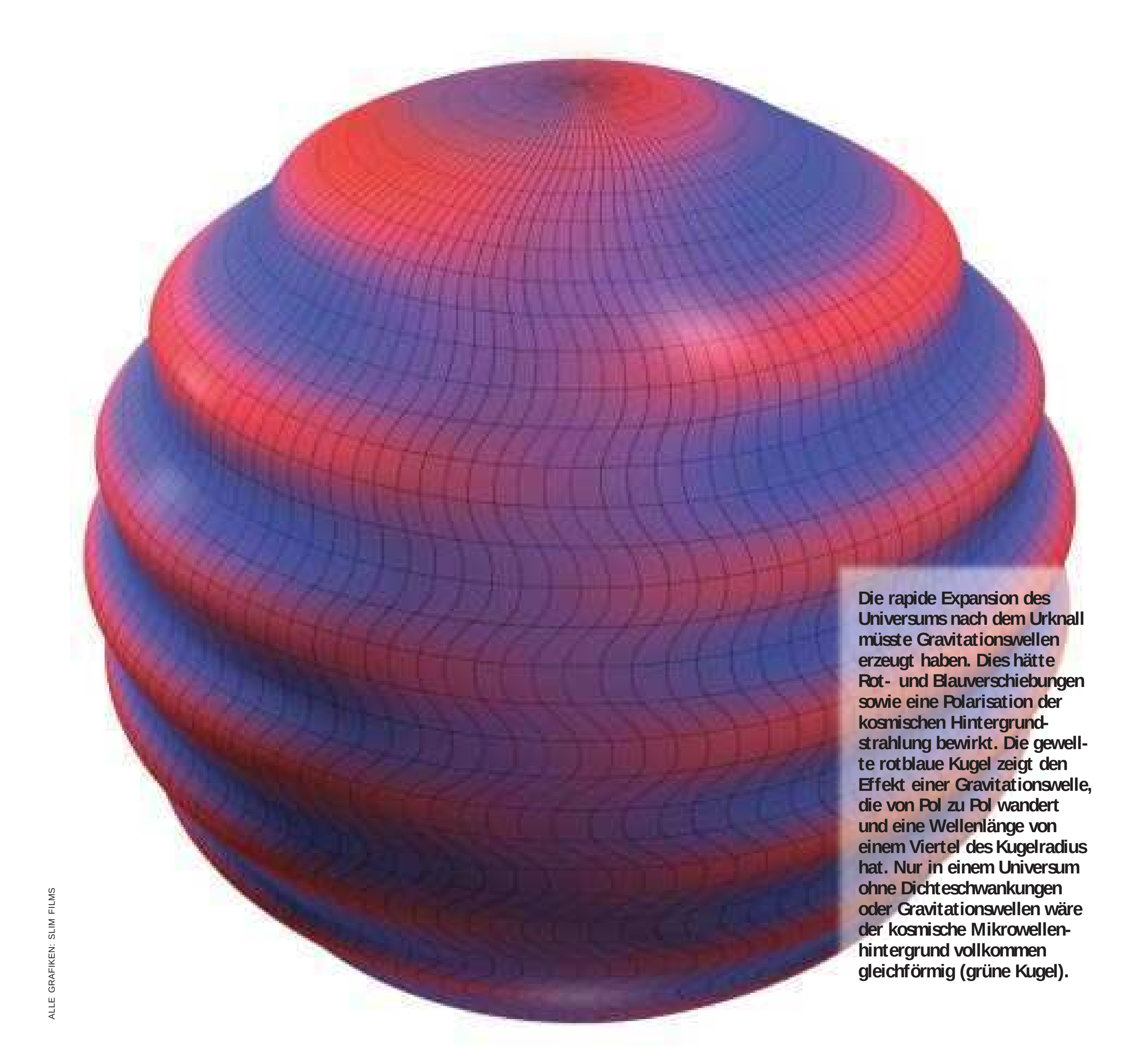
Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde etwa 500 000 Jahre nach dem Urknall erzeugt, als das Universum noch vom kosmischen Urplasma, einem heißen, dichten Gemisch subatomarer Teilchen, erfüllt war. Zu dieser Zeit fanden sich die Elektronen und Protonen in diesem „primordialen" Plasma zusammen, um neutrale Wasserstoffatome zu bilden. Das kosmische Gas wurde daraufhin für die Strahlung durchsichtig. Seither durcheilt diese elektromagnetische Strahlung ungehindert das All und trägt damit noch immer die Information über ihre Entstehung, vor allem über die Verteilung des Urgases zu jener Zeit.

Damit überliefert die Hintergrundstrahlung eine Momentaufnahme des Universums von diesem Zeitpunkt. Mit der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Jahre 1965 hielten die Forscher sozusagen den Rosetta-Stein der modernen Kosmologie in der Hand. Sie stellten fest, dass

- diese Strahlung die Erde aus allen Richtungen des Himmels erreicht, also das ganze All gleichmäßig durchdringt;
- das Strahlungsspektrum dem eines idealen „schwarzen Körpers" gleicht, dessen Temperatur bei 2,7 Kelvin liegt – nur knapp drei Grad über dem absoluten Nullpunkt;
- die Temperatur der Hintergrundstrahlung in jeder Richtung des Himmels – innerhalb der damaligen Messgrenzen – den gleichen Wert hat. Mit anderen Worten: Die kosmische Hintergrundstrahlung erscheint „isotrop", also „in allen Richtungen gleich".

Aus dieser bemerkenswerten Beobachtung folgte unmittelbar, dass auch das Urplasma im frühen Universum selbst besonders gleichförmig verteilt gewesen sein musste; jede größere Schwankung der Materiedichte hätte sich sonst auch als Temperaturschwankung der Hintergrundstrahlung bemerkbar gemacht.

Anfang der neunziger Jahre jedoch entdeckte der Satellit Cobe (*Cosmic Background Explorer*) dennoch minimale Variationen in der Strahlungstemperatur, und zwar im Bereich von 0,001 Prozent. Diese winzigen Unterschiede zwischen verschiedenen Himmelsrichtungen lieferten Hinweise auf ebenso geringe Verdichtungen und Verdünnungen im Urplasma. Aus diesen Fluktuationen der Materieverteilung entwickelten sich spä-



Die rapide Expansion des Universums nach dem Urknall müsste Gravitationswellen erzeugt haben. Dies hätte Rot- und Blauverschiebungen sowie eine Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung bewirkt. Die gewellte rotblaue Kugel zeigt den Effekt einer Gravitationswelle, die von Pol zu Pol wandert und eine Wellenlänge von einem Viertel des Kugelradius hat. Nur in einem Universum ohne Dichteschwankungen oder Gravitationswellen wäre der kosmische Mikrowellenhintergrund vollkommen gleichförmig (grüne Kugel).

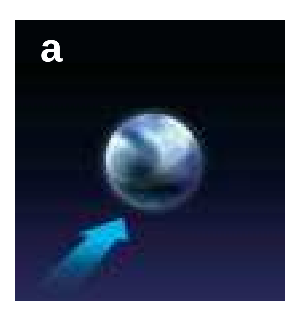
ter großräumige kosmische Strukturen: die Galaxien und Galaxienhaufen, die wir heute sehen.

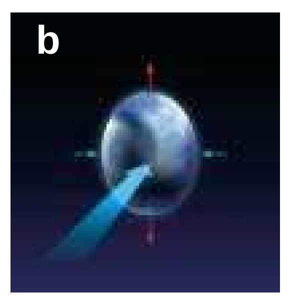
Ende der neunziger Jahre wurde die kosmische Hintergrundstrahlung mit Detektoren auf der Erde und auf Ballons mit viel feinerer Winkelauflösung als mit Cobe vermessen. Dabei offenbarten sich Strukturen im primordialen Plasma, die am Himmel weniger als ein Grad auseinander liegen. Zum Vergleich: Der Mond hat etwa einen Durchmesser von einem halben Grad am Himmel. Verteilung und Muster dieser Strukturen legten nahe, dass die Geometrie des Universums flach ist (siehe auch „Das neue Bild vom Kosmos“, Spektrum der Wissenschaft 3/1999, Seite 38).

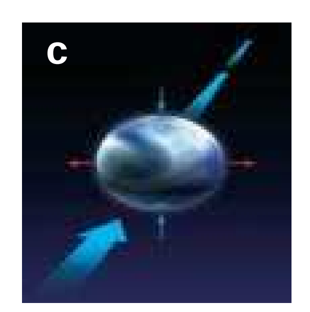
Diese Beobachtungen sind auch mit der so genannten Inflationstheorie verträglich. Sie besagt, dass direkt nach dem Urknall eine Phase außerordentlich schneller Expansion stattgefunden haben muss; durch die fast ruckartige und gewaltige Aufblähung über viele Größenordnungen hätte das Universum seine flache Geometrie angenommen. In diesem Jahr plant die Nasa, den Satelliten Map (*Microwave Anisotropy Probe*) zu starten. Mit diesem Himmelsspäher wollen die Kosmologen die Präzisionsvermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung auf den ganzen Himmel ausdehnen (siehe Kasten „MAP – ein kosmischer Kartograph“, Seite 54).

Der Planck-Satellit der europäischen Raumfahrtbehörde Esa soll ab dem Jahre 2007 eine noch genauere Durchmusterung der kosmischen Hintergrundstrahlung durchführen. Kosmologen erwarten, dass diese Daten eine fast unermessliche Fülle neuer Informationen über das frühe Universum zutage fördern werden. Insbesondere hoffen sie, damit endlich direkte Anzeichen für die Inflationsphase aufspüren zu können. Das wichtigste Indiz wäre die Beobachtung von Gravitationswellen, die der Kosmos während dieser kurzen Zeitspanne erzeugte: so genannte inflationäre Gravitationswellen. Im Jahr 1918 behauptete Albert Einstein die Existenz von Gravitationswellen als Konsequenz seiner Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie ähneln den elektromagnetischen Wellen – sichtbarem Licht, Radiowellen oder Röntgenstrahlen –, das heißt lichtschnell wandernden Störungen des elektromagnetischen Feldes: Gravitationswellen sind Störungen des Schwerefeldes, die sich gleichfalls mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Wie Licht- oder Radiowellen können auch Gravitationswellen Energie und Information transportieren, die sie ihrer Quelle entziehen. Mehr noch, Gravitationswellen können ungehindert Materie ▶











Bislang konnten Gravitationswellen noch nicht direkt beobachtet werden. Nach der Theorie sollten sie sich nachweisen lassen, da sie den durchquerten Raum dehnen und stauchen. Treffen sie auf eine Kugel (a), dehnen sie den Körper zuerst in der einen Richtung und kontrahieren ihn in der dazu senkrechten (b). Danach kehrt sich dieser Effekt um (c). Die Verzerrungen oszillieren mit der Frequenz der Welle (d und e) weiter; sie sind hier stark übertrieben dargestellt.

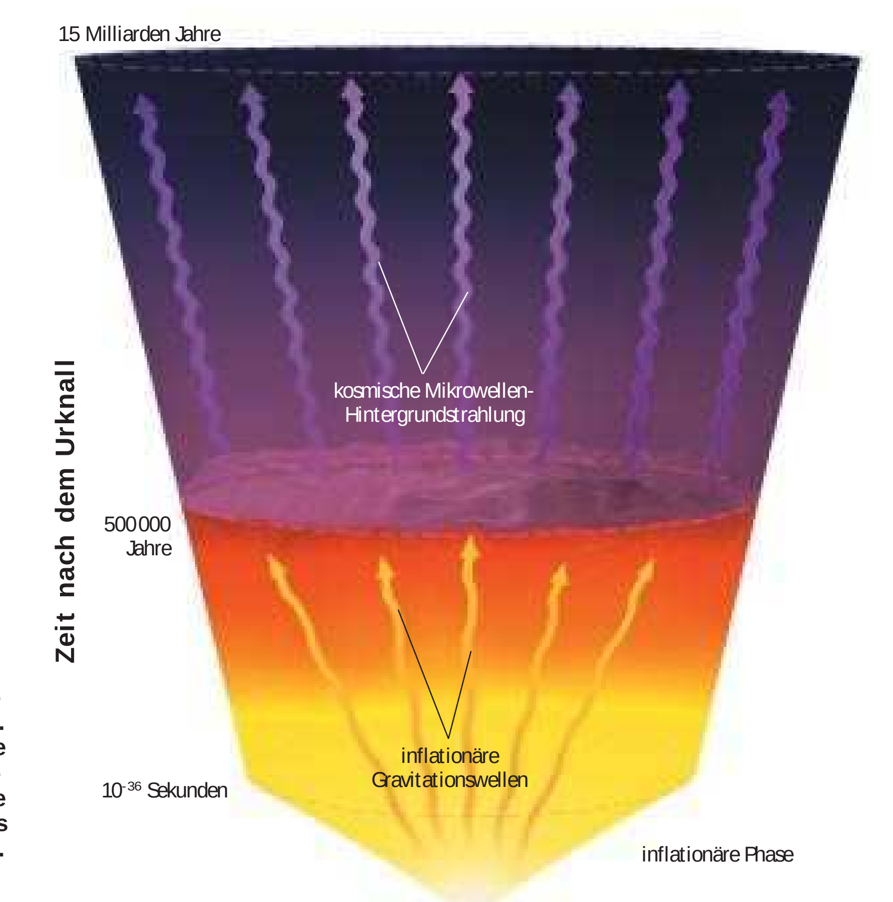
durchdringen, die keinerlei elektromagnetische Strahlung passieren ließe. So wie Mediziner mit Röntgenstrahlen durch Substanzen blicken können, die für sichtbares Licht undurchlässig sind, sollten die Gravitationswellen den Forschern astrophysikalische Phänomene offenbaren, die sonst unbeobachtbar wären. Obwohl der direkte Nachweis von Gravitationswellen bisher noch nicht gelungen ist, weisen astronomische Beobachtungen darauf hin, dass Paare kompakter Himmelskörper – Neutronensterne oder Schwarze Löcher – Gravitationswellen abstrahlen (siehe „Jagd auf Gravitationswellen“, Spektrum der Wissenschaft 12/2000, Seite 48).

Das Urplasma, welches das Universum während seiner ersten 500 000 Jahre erfüllte, war für elektromagnetische Strahlung zunächst undurchlässig; denn jedes ausgesandte Photon wurde in dem heißen Urgebräu subatomarer Elementarteilchen sofort gestreut. Deshalb können Astronomen auch keinerlei elektromagnetische Signale beobachten, die aus der Zeit vor der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung stammen.

Im Gegensatz dazu konnten sich Gravitationswellen durch das Plasma frei fortpflanzen. Die Inflationstheorie besagt, dass die explosive Expansion des Universums 10^{-38} Sekunden nach dem Urknall eben jene „inflationären“ Gravitationswellen erzeugt hat. Wenn diese Theorie zutrifft, dann müssten die Echos dieser Wellen 500 000 Jahre später in der kosmischen Hintergrundstrahlung winzige Irregularitäten hinterlassen haben. Deren Spuren sollen nun mit den empfindlichen Sensoren der Satelliten Map und Planck aufgespürt werden.

Wie die kosmische Inflation Gravitationswellen erzeugt haben könnte, erklärt sich durch eine der faszinierendsten Aussagen der Quantenmechanik: Der leere Raum – das „Vakuum“ – ist in Wahrheit gar nicht leer. Im Vakuum werden ständig so genannte virtuelle Paare von Elementarteilchen erzeugt und wieder vernichtet – jeweils ein Teilchen und ein Antiteilchen. Nach Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation können solche Teilchenpaare (mit der Energie ΔE) laufend entstehen und wieder vergehen, indem sie sich selbst wieder vernichten. Zwischendurch können sie (für eine extrem kurze Zeit Δt) real existieren.

Dabei gilt folgende Einschränkung: Das Produkt $\Delta E \times \Delta t$ ist stets kleiner oder gleich der Konstanten $h/4\pi$ ($h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ Joulesekunden ist das Plancksche Wirkungsquantum). Je größer also die Energie oder die Masse der virtuellen Teilchenpaare, desto kürzer ihre maximale Lebensdauer. Man braucht aber nicht zu befürchten, dass plötzlich aus dem leeren Raum virtuelle Äpfel oder Bananen auftauchen. Heisenbergs Formel gilt nur für Elementarteilchen und spielt für makroskopische Körper keine Rolle.



Während der Inflationsphase erzeugten Quantenprozesse ein Spektrum von „inflationären“ Gravitationswellen. Deren Nachhall durchquerte noch lange das kosmische Urplasma und verzerrte die 500 000 Jahre später emittierte kosmische Hintergrundstrahlung. Die präzise Vermessung dieser Strahlung verspricht den Nachweis der inflationären Wellen.

Ein solches Elementarteilchen ist das Graviton. Dieses Partikel bildet die kleinste Quanteneinheit von Gravitationswellen – ähnlich wie das Photon bei elektromagnetischen Wellen. Auch Paare virtueller Gravitonen entstehen und vergehen ständig im Gravitationsvakuum des Weltraums. Während der inflationären Expansionsphase sind die meisten virtuellen Gravitonen jedoch so schnell auseinandergerissen worden, dass sie sich nicht gleich wieder gegenseitig vernichten konnten. Deshalb wandelten sich viel mehr virtuelle Teilchen in reale Teilchen um als nach der Inflationsphase. Außerdem dehnte die rapide Expansion des jungen Kosmos die Wellenlänge der Gravitonen von mikroskopischen auf makroskopische Größenordnungen aus.

Auf diese Weise pumpte die kosmische Inflation Energie in die Erzeugung von Gravitonen und produzierte ein Spektrum von Gravitationswellen, das bis heute die Bedingungen in jenen ersten Momenten des Urknalls widerspiegelt. Wenn inflationäre Gravitationswellen tatsächlich existieren, sind sie die ältesten Überbleibsel im Universum – entstanden 500 000 Jahre vor Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Während die kosmische Hintergrundstrahlung am stärksten im Wellenlängenbereich zwischen 1 und 5 Millimetern empfangen wird (mit einem Intensitätsmaximum bei 2 Millimetern), erstrecken sich die Wellenlängen der inflationären Gravitationswellen über einen viel weiteren Bereich: von einem Zentimeter bis zu 10^{23} Kilometern, der Größe des heute beobachtbaren Universums. Mit Hilfe der Inflationstheorie konnten die Theoretiker folgende Eigenschaften dieser Wellen voraussagen:

➤ Die inflationären Gravitationswellen mit den größten Wellenlängen sind zugleich auch die intensivsten.

➤ Ihre Intensität hängt von der Expansionsrate des Universums während der Inflation ab. Diese Rate wird bestimmt von der kosmischen Energie am Beginn der Inflation und damit von der Temperatur des Universums zu jenem Zeitpunkt.

➤ Weil das Universum früher heißer war, hängt die Intensität der Gravitationswellen letztlich von dem Zeitpunkt ab, an dem die Inflation einsetzte.

Unglücklicherweise können die Kosmologen diesen Zeitpunkt selbst nicht genau berechnen. Denn die physikalische Ursache der Inflation ist vorläufig unbekannt. Einige Physiker stellten die Theorie auf, dass die Inflation einsetzte, als sich kurz nach der Entstehung des Universums drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen voneinander entkoppelten: die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft. Nach dieser Theorie bildeten die drei Kräfte vorher eine einheitliche Urkraft, die sich 10^{-38} Sekunden nach dem Urknall aufspaltete. Dieses Ereignis hätte demnach irgendwie die plötzliche Expansion des Kosmos ausgelöst.

Gravitationswellen-Detektoren

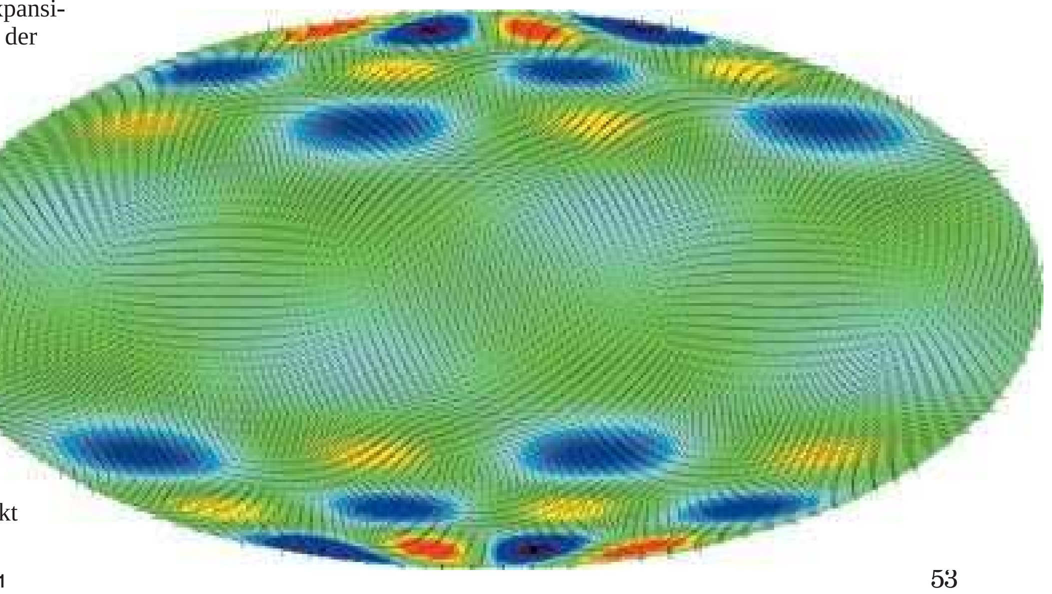
Dieser Theorie zufolge hätte die Inflation bei typischen Energien von 10^{15} bis 10^{16} GeV eingesetzt. (Ein GeV oder Gigaelektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es mit einer Spannung von einer Milliarde Volt beschleunigt wird. Die größten Teilchenbeschleuniger erreichen heutzutage Energien von 10^3 GeV.) – Andererseits: Wäre die Inflation des Kosmos durch ein anderes physikalisches Phänomen etwa zu einem späteren Zeitpunkt ausgelöst worden, so hätten diese Gravitationswellen dementsprechend weniger Energie mitbekommen.

Nach ihrer Erzeugung im ersten Sekundenbruchteil des Urknalls pflanzen sich die inflationären Gravitationswellen für alle Zeiten durch das All fort. Sie sollten also noch heute das Universum durchwandern. Aber wie können Kosmologen diese extrem schwachen und extrem langwelligen Signale beobachten? Dazu erinnern wir uns, wie ein gewöhnlicher Radioempfänger ein Signal empfängt: Radiowellen bestehen aus oszillierenden elektrischen und magnetischen Feldern, welche die Elektronen in der Antenne des Empfängers zum Hin- und Herschwingen anregen. Diese Bewegung der Elektronen erzeugt den Strom, den der Radioempfänger aufnimmt.

Auf die gleiche Weise erzeugt eine Gravitationswelle ein oszillierendes Dehnen und Kontrahieren des Raumes, durch den sie sich bewegt. Diese Oszillationen versetzen nach Einsteins Relativitätstheorie frei schwebende Testteilchen in winzige Erschütterungen. In den späten fünfziger Jahren versuchte Hermann Bondi, skeptische Kollegen von der physikalischen Realität solcher Wellen zu überzeugen. Der Physiker vom King's College in London beschrieb, wie ein hypothetischer Empfänger für Gravitationswellen funktionieren könnte. Bondis idealisierter Apparat bestand aus einem Paar von Ringen, die frei beweglich an einem langen, festen Balken hingen. Eine einlaufende Gravitationswelle der Amplitude h und der Frequenz f staucht und dehnt die Strecke L zwischen den beiden Ringen mit der Frequenz f, und zwar um den Betrag $h \times L$. Die Ringe reiben dabei am Balken – und diese Reibungswärme zeigt an, dass die Gravitationswelle Energie transportiert.

Gegenwärtig bauen Wissenschaftler komplizierte Gravitationswellen-Detektoren (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48). Mittels Laserstrahlen sollen die winzigen Bewegungen von hängen- ▶

Inflationäre Gravitationswellen müssten der kosmischen Hintergrundstrahlung ein erkennbares Muster aufgeprägt haben. In dieser simulierten Strahlungskarte des Gesamthimmels sind Temperaturvariationen (kältere Gebiete rot, wärmere blau) und Polarisationsmuster des Strahlungshintergrunds eingetragen.



Microwave Anisotropy Probe

Map – ein kosmischer Kartograph

In diesem Sommer will die Nasa die 4 Meter hohe, 830 Kilogramm schwere Sonde Map (Microwave Anisotropy Probe) starten. Bis zum Herbst wird der Satellit in seine vorgesehene Umlaufbahn um die Sonne gebracht – 1,5 Millionen Kilometer jenseits der Erdumlaufbahn. Danach soll er zwei Jahre lang die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung über den gesamten Himmel hinweg vermessen.

Map ist eigens dafür entwickelt worden, winzige Variationen in der Temperatur des Strahlungshintergrunds aufzuspüren – Unterschiede von nur 20 Millionstel Kelvin an Stellen, die am Himmel nicht größer sind als 0,23 Grad. Darum werden die Map-Ergebnisse viel detailreicher sein als die bisher beste Karte des Himmelshintergrunds, die in den frühen neunziger Jahren mit Cobe (Cosmic Background Explorer) erzielt wurde und nur sieben Grad Winkelauflösung hat. Map benutzt zwei Mikrowellen-Teleskope, die Rücken an Rücken angebracht sind, um die aus entgegengesetzten Richtungen eintreffende Strahlung (im Bild als rötliche Diagonale angedeutet) aufzufangen, in fünf Frequenzbändern zwischen 22 und 90 Gigahertz zu analysieren und auf winzige Temperaturunterschiede zu prüfen. Die Abschirmung auf der Rückseite der Solarzellen (orange) soll verhindern, dass Streulicht von Sonne, Erde oder Mond in die Instrumente eindringt. Da der Satellit sich einmal alle zwei Minuten um die eigene Achse dreht und einmal pro Stunde um die Präzessionsachse präzediert, wird mit der Zeit der gesamte Himmel überstrichen.



DON DIXON

Die Map-Sonde wird weit jenseits der Erdumlaufbahn um die Sonne kreisen.

den Spiegeln als Testmassen aufgespürt werden. Die Entfernung zwischen den Spiegeln legt den Wellenlängenbereich fest, den diese Experimente registrieren können: je größer, desto breitbandiger. Der größte dieser Detektoren – mit vier Kilometern Entfernung zwischen den Spiegeln – wird in der Lage sein, Gravitationswellen mit Wellenlängen von 30 bis 30 000 Kilometern einzufangen.

Ein weiteres von der Nasa geplantes Weltraum-Observatorium soll noch tausendmal größere Wellenlängen registrieren, etwa von Gravitationswellen, die bei der Kollision von Neutronensternen oder beim Zusammenstoß Schwarzer Löcher entstehen. Aber die inflationären Gravitationswellen sind in diesem Wellenlängenbereich viel zu schwach, um in solchen Detektoren direkt messbare Signale zu erzeugen.

Die stärksten der inflationären Gravitationswellen sind, wie erwähnt, die mit den längsten Wellenlängen – vergleichbar dem Durchmesser des sichtbaren Universums. Um sie nachzuweisen, müssen die Forscher eine Anordnung von frei schwebenden Testmassen beobachten, die ähnlich weit voneinander entfernt sind. Zum Glück stellt uns die Natur eine solche Anordnung zur Verfügung: das kosmische Urplasma, von dem einst die kosmische Hintergrundstrahlung ausging.

Während der 500 000 Jahre zwischen dem Zeitpunkt der Inflation und der Emission der kosmischen Hintergrundstrahlung durcheilten die extrem langen inflationären Gravitationswellen das frühe Universum und dehnten und stauchten dabei abwechselnd das Plasma. Forscher können diese Oszillationen heutzutage beobachten, indem sie in der kosmischen Hintergrundstrahlung nach winzigen so genannten Doppler-Verschiebungen suchen. Durch den Doppler-Effekt werden die von einem Sender, der sich auf uns zu bewegt, ausgehenden Wellen verkürzt („bläulicher"), und bei einem Sender, der sich von uns entfernt, verlängert („rötlicher").

Wenn zu der Zeit, als die kosmische Hintergrundstrahlung emittiert wurde, eine Gravitationswelle eine Region des Plasmas in unsere Richtung – das heißt in Richtung des Teils des Universums, aus dem später unsere Milchstraße wurde – gedehnt hat, so wird die Strahlung aus dieser Region bläulicher erscheinen; denn sie wurde zu kürzeren Wellenlängen (und damit höherer Temperatur) verschoben. Wenn hingegen eine Gravitationswelle damals eine Plasmaregion von uns weg bewegte, wird uns die Hintergrundstrahlung von dort heute rötlicher erscheinen; denn sie wurde zu längeren Wellenlängen (und damit tieferer Temperatur) verschoben.

Solche blauen und roten Stellen in der kosmischen Hintergrundstrahlung, die mit wärmerer und kälterer Strahlung zusammenhängen, würden Plasmabewegungen offenbaren, die von inflationären Gravitationswellen stammen. Das gesamte Universum selbst würde dabei als Gravitationswellendetektor dienen.

Doch die Umsetzung dieser Idee ist nicht so einfach. Denn auch die Dichteschwankungen im frühen Universum verursachten Temperaturunterschiede in der kosmischen Hintergrundstrahlung.

So sind zwei konkurrierende Effekte am Werk: Das Gravitationsfeld etwa der dichteren Plasmaregionen verschob die von dort stammenden Photonen nach rot, was für einen Teil der von Cobe beobachteten Temperaturfluktuationen verantwortlich ist. Wenn die Kosmologen allein auf die Temperaturunterschiede der Hintergrundstrahlung schauen, können sie also nicht unmittelbar sagen, welcher Anteil von inflationären Gravitationswellen stammt.

Verräterische Polarisationsmuster

Zumindest eines steht fest: Dieser Anteil kann nicht größer sein als die Fluktuationen, die mit Cobe und anderen Detektoren beobachtet wurden. Allein diese Tatsache liefert eine interessante Schranke für das physikalische Phänomen, das die Ursache für die Inflation war: Die Inflationsenergie muss, so läßt sich berechnen, geringer als 10^{16} GeV gewesen sein. Schon deshalb kann die inflationäre Phase nicht früher als 10^{-38} Sekunden nach dem Urknall eingetreten sein.

Aber wie kommen die Kosmologen nun weiter? Wie können sie die Unsicherheit über den Ursprung der Temperaturdifferenzen umgehen? Die Antwort steckt in der Polarisation der Hintergrundstrahlung. Wird ein Lichtstrahl von einer Oberfläche um fast 90 Grad gestreut, so wird er dabei „linear polarisiert“: Die Wellen schwingen nur mehr in einer bestimmten Ebene. Das ist der Effekt, den polarisierte Sonnenbrillen ausnutzen: Weil das vom Boden gestreute Licht typischerweise horizontal polarisiert ist, reduzieren die Filter in diesen Gläsern das Blenden, indem sie Lichtwellen mit horizontaler Schwingungsebene absorbieren.

Auch die kosmische Hintergrundstrahlung ist teilweise polarisiert. Kurz bevor das frühe Universum für Strahlung durchlässig wurde, streuten die Photonen der Hintergrundstrahlung ein letztes Mal an den Plasma-Elektronen. Einige Photonen wurden stark gestreut und dadurch polarisiert.

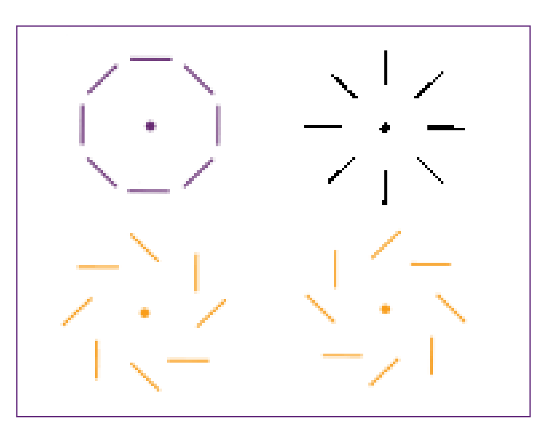
Dieser Effekt liefert den Forschern einen Schlüssel zum Nachweis der inflationären Gravitationswellen: Die von solchen Wellen verursachten Plasmabewegungen erzeugen ein anderes Polarisationsmuster als die Dichteschwankungen. Die Idee ist eigentlich recht einfach. Die lineare Polarisation der Hintergrundstrahlung lässt sich durch kurze Striche darstellen, welche die Polarisationsrichtung in der jeweiligen Himmelsregion angeben (siehe Abbildung auf Seite 53). Diese Striche sind manchmal in ringförmigen oder in radialen Mustern angeordnet. Die Striche können auch rotierende Wirbel bilden, die sich rechts- oder linkshändig – im Uhrzeigersinn oder gegen ihn – zu drehen scheinen (siehe Skizze rechts).

Der Drehsinn dieser Muster verrät ihren Ursprung. Die Dichteschwankungen des Urplasmas konnten solche Polarisationsmuster nicht erzeugen, denn dichte oder dünne Plasmaregionen haben keine rechts- oder linkshändige Orientierung. Gravitationswellen dagegen zeigen eine bestimmte Händigkeit: Sie pflanzen sich in einer entweder rechts- oder linksdrehenden Schraubenbewegung fort. Das von Gravitationswellen erzeugte Polarisationsmuster sieht aus wie eine zufällige Überlagerung vieler verschieden großer rotierender Wirbel. Diese Muster haben also einen Drehsinn, die von Masseninhomogenitäten verursachten Muster nicht.

Nicht einmal das schärfste Auge vermag in dem Polarisationsdiagramm auf Seite 53 Muster mit Drehsinn zu entdecken. Aber eine so genannte Fourier-Analyse (ein mathematisches Verfahren, das ein Bild in eine Reihe von Wellenformen auflöst) kann ein Polarisationsmuster in Bestandteile mit und ohne Drehsinn auflösen. Gelingt es den Kosmologen, die Polarisation der Hintergrundstrahlung zu messen und den Anteil der Muster mit Drehsinn zu bestimmen, dann können sie damit auch die Amplitude der extrem langen inflationären Gravitationswellen berechnen. Weil die Amplitude durch die Energie der Inflation bestimmt wurde, lässt sich daraus die Größenordnung dieser Energie direkt ableiten. Das Resultat würde die Frage klären, ob die Inflation durch das Entkoppeln der vereinigten Fundamentalkräfte ausgelöst wurde.

Wie gut sind die Aussichten, solche Drehmuster zu entdecken? Der Nasa-Satellit Map sowie andere Experimente auf der Erde und auf Ballons könnten vielleicht zum allerersten Mal die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung nachweisen. Aber die Instrumente sind wohl noch nicht empfindlich genug, um die von inflationären Gravitationswellen verursachte Drehkomponente aufzuspüren. Erst spätere Experimente dürften diesem Ziel näher kommen.

Falls die Inflation tatsächlich durch die Entkopplung von drei Urkräften ausgelöst wurde, ist ihr Gravitationswellen-Echo möglicherweise stark genug, um vom geplanten Satelliten Planck entdeckt zu werden. Aber wenn die Inflation durch einen anderen Prozess später und damit bei geringeren kosmischen Energien stattfand, wären die Gravitationswellen viel zu schwach, um sie in absehbarer Zukunft entdecken zu können.



Die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung könnte Aufschluss über die Geschichte des frühen Universums geben. Dichteschwankungen im Urplasma rufen ringförmige und radiale Polarisationsmuster hervor (oben). Hingegen erzeugen Gravitationswellen links- und rechtsdrehende Wirbel (unten).

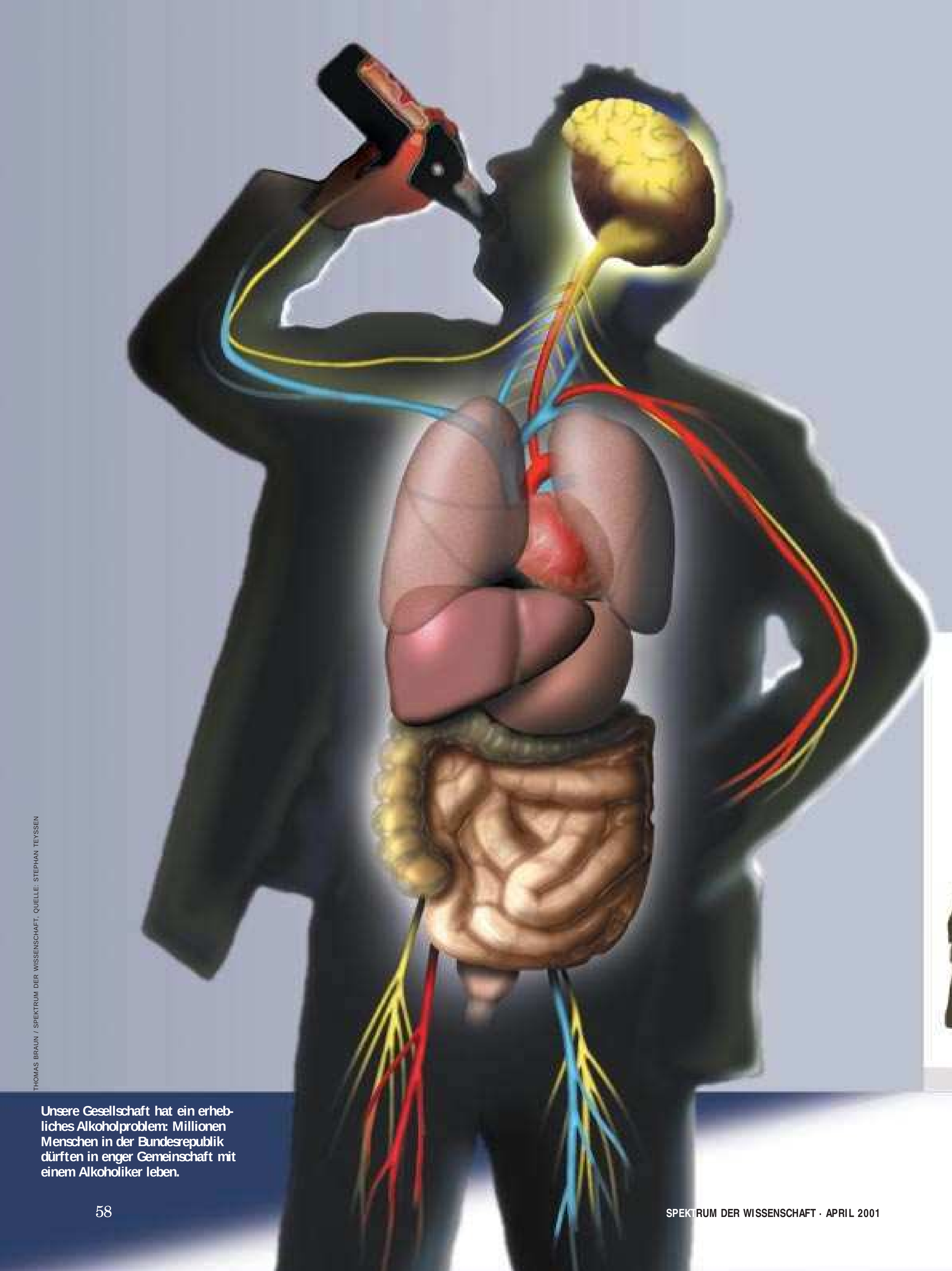
Noch sind sich die Forscher über den Ursprung der kosmischen Inflationsphase nicht sicher. So können sie auch die Stärke des Polarisationssignals in der Hintergrundstrahlung, das auf inflationäre Gravitationswellen zurückgeht, nicht definitiv vorhersagen. Aber wenn es nur eine kleine Chance gäbe, dieses Signal zu beobachten, wäre das die Mühe wert. Seine Entdeckung würde nicht nur unstrittige Beweise für die Inflation liefern, sondern auch einen Blick in die frühesten Zeiten unseres Universums ermöglichen – nämlich in die ersten 10^{-38} Sekunden nach dem Urknall. Dann könnten wir uns der größten Frage überhaupt zuwenden: Wo kommt das Universum eigentlich her? ■

Robert R. Caldwell *promovierte 1992 in Physik an der Universität von Wisconsin-Milwaukee. Der Assistenz-Professor für Physik und Astronomie am Dartmouth College ist einer der Mitbegründer der Quintessenz-Theorie.* **Marc Kamionkowski** *promovierte 1991 in Physik an der Universität Chicago und ist Professor für Theoretische Physik und Astrophysik am California Institute of Technology.*

Literaturhinweise

First Space-Based Gravitational-Wave Detectors. Von Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski und Leven Wadley in: Physical Review D, Bd. 59, S. 27101 (1999).

Weblinks finden Sie unter ***www.wissenschaft-online.de/spektrum/***



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, QUELLE: STEPHAN TEYSSEN

Unsere Gesellschaft hat ein erhebliches Alkoholproblem: Millionen Menschen in der Bundesrepublik dürften in enger Gemeinschaft mit einem Alkoholiker leben.

ALKOHOL

Das unterschätzte Gift

Welche medizinischen Risiken schon kleine Mengen alkoholischer Getränke bergen, ist wenig bekannt. Regelmäßiger Konsum erhöht die Gefahr für zahlreiche Krankheiten. Gemessen an seinen gesundheitlichen, sozialen und gesellschaftlichen Auswirkungen ist Alkohol in unserer Kultur die Droge Nummer eins.



Von Stephan Teyssen und Manfred V. Singer

„*Er trank sieben Krüge Bier. Da wurde er entspannt und heiter, er wurde glücklich und sein Gesicht strahlte.*" Der Zecher war Enkidu, Freund und Begleiter des sumerischen Königs Gilgamesch – so das altorientalische Epos.

Alkoholische Getränke bereiten die Menschen seit altersher. Die anregende, enthemmende und berauschende Wirkung von gegorenen Früchten oder Getreide entdeckten sie bereits vor Jahrtausenden. Der Gebrauch von Alkohol wurde vielfach ritualisiert – bis hin zum Wein als Altarsakrament im Christentum. In vielen Kulturkreisen sind erheiternde Getränke zudem als Genussmittel gesellschaftlich etabliert. Auch heute halten wir einen gelegentlichen Schwips für normal. Einen Rausch ertragen wir häufig mit Humor.

In vielen Kulturen gehörten und gehören Alkoholika wie selbstverständlich zu den täglichen Nahrungsmitteln. In früheren Jahrhunderten hatte der Konsum auch eine hygienische Berechtigung: Wasser war oft unsauber. Außerdem war dies eine Form der Konservierung leicht verderblicher Speisen („Kleine Kulturgeschichte des Alkohols", Spektrum der Wissenschaft 8/98, S. 62).

Solche Ansprüche können wir heute anders erfüllen. Dennoch konsumieren die Menschen vieler westlicher Länder alkoholische Getränke in großen Mengen. Mit über zehn Litern reinen Alkohols pro Einwohner im Jahr gehören die Deutschen international zu den Spitzenreitern. Pro Kopf entspricht das 134 Litern Bier und anderer Getränke, und diese Zahl täuscht noch: So konsumieren in der Schweiz 7 Prozent der Fünfzehn- bis Fünfundsiebzigjährigen die Hälfte der Alkoholika. Insgesamt 50 Prozent dieser Altersgruppe trinken mehr als 95 Prozent der Droge. Für die anderen westlichen Länder dürften ähnliche Zahlen gelten.

Meist wird die gesundheitliche Beeinträchtigung durch Alkoholkonsum verharmlost. Dass die Droge wegen ihrer Wirkung auf die Psyche süchtig machen kann, ist zwar weithin bekannt. Nur wird oft unterschätzt, wie viele Menschen schon ein Frühstadium des Alkoholismus erreicht haben. Dass Alkohol Leber, Gehirn und andere Organe angreift, wissen die meisten Menschen. Im Alltag kümmern sie sich darum aber wenig. Vielen ist auch gar nicht bewusst, dass schon das tägliche Glas Wein oder Bier einzelne Organe schädigen kann und das Risiko für Krebs erhöht. Dagegen schätzen wir die stimmungsfördernde Wirkung in geselliger Runde hoch.

Ambivalenz prägt die Alkohol-Aura: Einseitige Werbung unterstützt noch den unbekümmerten Umgang mit Alkoholika. Viele der in den letzten Jahren verbreiteten Meldungen, Rotwein etwa würde vor Herz- und Kreislauferkrankungen schützen, sind nur eingeschränkt wahr. Oft beruhen die Daten dazu nicht auf soliden wissenschaftlichen Forschungen, sondern sind schlecht abgesicherte Nebenergebnisse anderer Studien. Fatale Wirkungen von Alkohol, die gleichzeitig auftreten können, werden nur zu oft verschwiegen.

Besonders unverantwortlich ist es, solche Getränke anderen ohne ärztliche Rücksprache unbedenklich zur Unter- ▶

stützung der Gesundheit zu empfehlen. Ein „Drink“ am Tag scheint unter bestimmten Voraussetzungen zwar tatsächlich einer Arteriosklerose und damit Herzinfarkt und Schlaganfall entgegenzuwirken. Doch ist inzwischen auch erwiesen, dass andere Organsysteme unter dem Konsum leiden, sogar schon, wenn es sich nur um geringe Mengen handelt.

Die bei uns übliche Einstellung zum Alkohol ist längst ein gesellschaftliches Problem. Das betrifft nicht nur die beträchtlichen Krankheitskosten, sondern auch die weit reichenden sozialen Auswirkungen. Die leichtfertige Handhabe fördert den Missbrauch bis hin zur Trunksucht. Denn nicht jeder versteht es, mit berauschenden Getränken sozialverträglich und selbstverantwortlich umzugehen. Offenbar sind manche Menschen für Alkoholmissbrauch beziehungsweise für den krankhaften Alkoholismus anfälliger als andere.

Seit 1968 gilt Alkoholismus als Krankheit. Streng genommen fällt darunter noch nicht die rein psychische Alkoholabhängigkeit. Erst wer bei Enthaltsamkeit auch die typischen körperlichen Entzugssymptome zeigt, ist nach heutiger medizinischer Auffassung Alkoholiker. Das typische und wichtigste Symptom der psychischen Abhängigkeit ist der „Kontrollverlust“: Wenn er einmal zu trinken angefangen hat, kann der Kranke nicht mehr damit aufhören. Hat sich die Sucht einmal entwickelt, bleibt sie anscheinend bestehen – selbst nach jahrelanger Abstinenz: Auch der „trockene“ Alkoholiker bleibt lebenslänglich krank.

Maßstab für „Drinks“



So viel reinen Alkohol enthalten einige übliche Getränke. In einen „Standarddrink“ gehören nach einer internationalen Konvention seit 1998 zehn Gramm Alkohol.

Hinzu kommt als Merkmal der psychischen Abhängigkeit das starke, oft unbezwingbare Verlangen nach Alkoholika. Die körperliche Abhängigkeit äußert sich zum einen darin, dass der Betroffene am Anfang scheinbar immer mehr Alkohol „verträgt“ und auch immer mehr braucht, um noch die gleiche angenehme Wirkung zu erreichen. Zum anderen erleidet er ohne die Droge Entzugserscheinungen wie Zittern, Schweißausbrüche, Herzjagen, innere Unruhe.

Nach Schätzungen der Deutschen Hauptstelle gegen die Suchtgefahren leben hier zu Lande rund zweieinhalb Millionen behandlungsbedürftige Alkoholkranke. An den Folgen übermäßigen Trinkens sterben in der Bundesrepublik jährlich etwa vierzigtausend Menschen, siebzehntausend davon an Leberzirrhose. Jedes Jahr werden hier mehr als 2200 alkoholgeschädigte Kinder geboren. Und wahrscheinlich sind 250000 Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene unter fünfundzwanzig Jahren stark alkoholgefährdet oder bereits abhängig.

Kosten des Alkoholismus

Die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten durch Alkoholmissbrauch und -abhängigkeit belaufen sich in Deutschland auf 30 bis 80 Milliarden DM jährlich, eingerechnet die Belastungen des Gesundheitswesens, die Verluste an Produktivität sowie die Folgekosten von alkoholbedingten Verkehrsunfällen und Straftaten. An Alkoholsteuern nimmt der Staat demgegenüber zur Zeit mehr als sieben Milliarden Mark ein. Und die deutsche Alkoholwirtschaft setzt seit geraumer Zeit etwa gleich bleibend zwischen 30 und 35 Milliarden Mark um und beschäftigt rund 85000 Menschen.

Kliniker schätzen, dass bis zu drei Viertel der Alkoholiker, die zu einer stationären Entwöhnungsbehandlung kommen, gleichzeitig an anderen spezifischen organischen Folgekrankheiten des Alkoholkonsums leiden. Leberschäden stellen nur einen Teil davon dar. Auch betreibt von den Patienten unter 65 Jahren, die einen allgemeinen Arzt aufsuchen, rund jeder zehnte chronischen Alkoholmissbrauch – wie etwa jeder fünfte derjenigen, die ins Krankenhaus eingeliefert werden. Es gibt kaum ein Organ, welches nicht in Folge des chronischen Alkoholgenusses geschädigt werden kann. Darum ist es wichtig, dass niedergelassene Ärzte wie Kliniker mit alkoholassoziierten Krankheiten rechnen, sie erkennen und den Zusammenhang gegebenenfalls auch ansprechen. Mediziner unterscheiden dabei allerdings zwischen vorübergehenden („akuten“) und dauerhaften („chronischen“) Organschäden.

Auch verursacht der in den Getränken enthaltene Alkohol selbst direkt nur einen Teil der Reaktionen. Manche seiner Abbauprodukte sind ebenfalls giftig. Und auch andere Inhaltsstoffe von Alkoholika

Glossar

Alkoholismus (Alkoholkrankheit, Alkoholabhängigkeit, Trunksucht)
Der Alkoholkranke verspürt ein unbezwingbares Verlangen nach Alkohol beziehungsweise nach Fortsetzung des Trinkens. Die Abhängigkeit entsteht allmählich und steigert sich gewöhnlich über Jahre. Typisch sind der Kontrollverlust nach Trinkbeginn und der chronische Missbrauch. Der Begriff „Alkoholismus“ kam Mitte des 19. Jahrhunderts auf. Seit 1968 ist das Leiden in Deutschland als chronische Krankheit anerkannt. Unbehandelt führt die Alkoholkrankheit oft zum Tode.

Alkoholmissbrauch
Der Alkoholkonsum ist so hoch, dass er körperliche, psychische und soziale Schäden nach sich zieht. Nicht immer besteht zugleich Alkoholabhängigkeit.

Psychische Alkoholabhängigkeit
Das Verlangen nach Alkohol ist wegen seiner euphorisierenden, Stress mindernden Wirkung unbezwingbar. Der Entzug erzeugt Unruhe, depressive Verstimmungen, Angst.

Körperliche (physische) Alkoholabhängigkeit
Bei Abstinenz treten je nach Stadium leichte bis sehr schwere körperliche Entzugssymptome auf: insbesondere vegetative Störungen, Zittern, feuchte Hände, Schweißausbrüche, innere Unruhe, Herzjagen, Schlaflosigkeit, hoher Blutdruck, in sehr schweren Fällen auch Krämpfe, Halluzinationen und Bewusstseinstrübungen.

setzen Organen zu. Einige werden erst im Körper in toxische oder Krebs erregende Substanzen umgewandelt.

Beispielhaft möchten wir einige der häufigsten körperlichen Schädigungen infolge Alkoholkonsums beschreiben. Der Alkohol selbst ist zwar nach heutigem Wissen kein Kanzerogen, also für die Zellen nicht unmittelbar Krebs erregend, jedoch für die Gewebe ein Gift.

Bereits kleine Mengen der chemischen Verbindung „Ethanol" – des in den Getränken enthaltenen Gärprodukts (fachsprachlich auch Ethylalkohol genannt) – greifen direkt die Schleimhautzellen von Mundhöhle, Speiseröhre und Magen an. Viele Zellen entzünden sich oder sterben sogar ab. Mediziner sprechen von „Erosion". Wenn man mehrere Schnäpse trinkt, ruft dies besonders in der unteren Speiseröhre akute Entzündungen hervor, was wegen der Aktivierung von Immunreaktionen den Schaden noch steigert. Hinzu kommt, dass ein höherer Blutalkoholspiegel die regelmäßigen Muskelkontraktionen der Speiseröhre hemmt, die den Inhalt in den Magen befördern. Auch der Schließmuskel am unteren Ende der Speiseröhre erschlafft. Magensäure beziehungsweise der saure Mageninhalt gelangen dann leicht in die Speiseröhre und sogar bis in den Mund und reizen die entzündeten Schleimhäute noch mehr. Der Patient verspürt Sodbrennen, saures Aufstoßen und schmerzhafte Schluckbeschwerden. In ernsten Fällen verengt sich die entzündete Speiseröhre so stark, dass eine Operation notwendig wird. Die erschlaffte Muskulatur ist auch der Hintergrund, weshalb schlafende Betrunkene an Erbrochenem ersticken können.

Schäden durch Alkohol an der Magenschleimhaut beschrieb der kanadische Arzt William Beaumont bereits 1833, als er einen Patienten mit einer Bauchwunde behandelte, in dessen Magen er hineinsehen konnte. Wenn dieser Mann viel Alkohol getrunken hatte, rötete und entzündete sich die Schleimhaut kurz darauf stark und bildete einen trüben Schleim.





STEPHAN TEYSSEN / MANFRED V. SINGER

Wenn Whisky in den Magen gelangt, entzündet sich die Schleimhaut (oben). Auch 24 Stunden später ist diese noch nicht abgeheilt (unten).

Heute wissen wir, dass vor allem höherprozentige Getränke wie Whisky und Cognac, aber auch Bier und Wein die Magenschleimhaut reizen und anschwellen lassen. Sie rufen akute Entzündungen, Einblutungen und Zellabschilferungen hervor, wobei Zellen direkt absterben. Mitunter tritt dann eine blutige alkoholische Magenschleimhautentzündung auf, eine „akute erosive Gastritis". Der Patient merkt davon meist nichts, weil er keine Schmerzen verspürt. Allerdings wirkt mit Wasser verdünnter purer Alkohol oft verheerender als manches alkoholische Getränk vergleichbaren Alkoholgehalts. Diese Getränke, etwa Rotwein, enthalten offenbar „Schutzstoffe", welche die Reizstoffe „abpuffern".

Über welchen Mechanismus alkoholische Getränke als Aperitif („Appetitanreger") und Digestif („Verdauungshilfe") wirken und eine voluminöse Mahlzeit besser verträglich machen, ist weitgehend unbekannt. Möglicherweise werden dadurch bestimmte Signalstoffe freigesetzt, welche die Verdauung auch über das Gehirn aktivieren. Der Alkohol selbst regt die Magensäureproduktion, wenn überhaupt, nur in niedrigen Konzentrationen bis zu fünf Volumenprozent an. Hochprozentige Alkoholika ab etwa zwanzig Volumenprozent hemmen die Säureproduktion sogar. Wie wir jüngst am Beispiel von Bier nachwiesen, wirken hingegen bestimmte Nebenprodukte des Gärprozesses stimulierend: nämlich Bernsteinsäure und Maleinsäure. Destillierte Getränke fördern die Magensäure-Sekretion praktisch nicht.

Die Schleimhaut des Dünndarms wird durch Alkohol ebenfalls in Mitleidenschaft gezogen. Akut treten Rötungen, Zellabschilferungen und kleinere Blutungen auf. Wie im Magen wirkt der Alkohol einerseits beim Kontakt direkt toxisch auf die Zellen und löst andererseits einen Entzündungsprozess aus, der die Durchblutung des Dünndarms behindert. Vorübergehend stört das auch die aktive Aufnahme von Nährstoffen durch die Darmwand.

Die meisten dieser akuten Veränderungen nach Alkoholgenuss bilden sich bald wieder zurück. Allerdings dauert es zum Beispiel mehr als 24 Stunden, bis eine blutige Magenschleimhautschädigung nach dem Genuss eines scharfen Getränks abheilt. Dass die fortgesetzten Erosionen, die bei regelmäßigem Alkoholkonsum auftreten, langfristig chronische Schäden hervorrufen können, ist evident.

Wie stark viele verschiedene krankhafte Prozesse ineinander greifen, lässt sich gut am Beispiel des Dünndarms beschreiben. Bei ständiger Entzündung schwindet die Oberfläche dieses Darmabschnitts. Das wurde bei Männern nachgewiesen, die mehr als 60 Gramm Alkohol pro Tag zu sich nehmen, und bei Frauen, die täglich mehr als 30 bis 40 Gramm konsumieren. Wahrscheinlich hemmt das ▶

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON WALTER BACK, UNIVERSITÄT MANNHEIM





Chronischer Alkoholmissbrauch schädigt die Herzmuskelzellen. Das Herz leiert regelrecht bis fast auf das Doppelte aus (links); rechts ein gesundes Herz.

Ethanol die normale regelmäßige Zellerneuerung. Der Organismus leidet dadurch bald an Nährstoffmangel. Besonders Traubenzucker – den wichtigsten Energielieferanten – und Aminosäuren, aus denen Proteine aufgebaut werden, erhält der Körper nun nicht mehr in nötiger Menge. Solche Patienten verlieren Gewicht. Und sie leiden an Durchfall. Denn infolge der Mangelernährung funktioniert auch der Wasser- und Elektrolythaushalt nicht mehr gut. Hinzu kommt, dass in dem gestörten Milieu Bakterien wuchern, die normalerweise im Dünndarm nicht vorkommen. Wenn gleichzeitig die Bauchspeicheldrüse chronisch entzündet ist, was bei Alkoholmissbrauch oft vorkommt, und sie deswegen nicht genügend Verdauungsenzyme liefert, kann die Nahrung schon wegen Enzymmangels nicht hinreichend aufgeschlossen werden.

Die bei chronischem Alkoholmissbrauch häufigen Lebererkrankungen und viele andere typische Organschäden dürften zu einem wesentlichen Teil auf die Verdauungsstörungen im Dünndarm zurückgehen. Im oberen Dünndarm gelangen durch die geschädigte Schleimhaut fatalerweise vermehrt schädliche Stoffe ins Blut und in die Lymphe. Darunter sind sehr große Moleküle, die eigentlich vorher hätten zerlegt werden müssen, außerdem so genannte Endotoxine, bakterielle Gifte. Auf die „Blutvergiftung“ reagieren Immunzellen. Sie setzen im ganzen Körper entzündliche Stoffe frei, Cytokine und Interleukine, die auch Leber und Bauchspeicheldrüse in Mitleidenschaft ziehen. Wie das im Einzelnen abläuft, ist allerdings noch Gegenstand der Forschung.

Regelmäßiger Alkoholkonsum steigert erheblich das Risiko für viele Krebsarten. Je mehr jemand trinkt, umso höher wird es. Ethanol selbst wirkt zwar wohl nicht direkt Krebs erregend. Doch durch Alkohol vorgeschädigte Zellen sind durch Kanzerogene besonders angreifbar. Diese nehmen wir mit Nahrungsmitteln auf, oder sie entstehen in der Leber aus Vorstufen. Auch Alkoholika enthalten solche Substanzen. Eine gesunde Leber kann Kanzerogene und Gifte weitgehend entschärfen. Doch unter Alkoholeinfluss vermag sie das viel weniger, zumal der Alkohol selbst diese Funktionen mindert: Denn die Leber baut den Alkohol immer bevorzugt ab. So häufen sich die Krebs erregenden Verbindungen im Blut und haben zu den entzündeten, darum besonders verletzlichen Schleimhäuten lange Kontakt – ein Teufelskreis.



M. STOLTE

Chronischer Alkoholmissbrauch bewirkt einen Umbau des Bindegewebes der Bauchspeicheldrüse mit Calcium- und Proteinablagerungen.

Schon bei nicht sonderlich großen Trinkmengen wächst die Gefahr, dass sich in der Schleimhaut von Mundhöhle, Kehlkopf, Rachen und Speiseröhre bösartige Tumoren bilden, so genannte Karzinome. Hierbei ist die Alkoholmenge entscheidend; die Art des Getränks spielt anscheinend keine große Rolle. Einer neuen Heidelberger Studie zufolge steigt das Risiko, an einem Mundhöhlen- oder Kehlkopfkrebs zu erkranken, bei 75 bis 100 Gramm Alkohol täglich, also schon drei bis vier großen Bieren oder einer Flasche Wein, um mehr als das Dreizehnfache. Wenn jemand außerdem raucht, wird das Risiko noch deutlich höher. Obwohl Alkohol eine akute Gastritis hervorrufen kann, steigt aber nach heutigem Wissen bei häufigem Alkoholmissbrauch das Risiko für eine chronische Magenschleimhautentzündung, ein Magen- oder Zwölffingerdarmgeschwür und für Magenkrebs nicht.

Erosion mit Folgeschäden

Aber die Gefahr für Enddarmkrebs steigt durch Alkoholgenuss, höchstwahrscheinlich auch die für Dickdarmkrebs. Gutartige Dickdarmpolypen bilden sich zwei- bis dreimal so häufig wie sonst. Wer am Tag mehr als einen Liter Bier trinkt, bekommt Enddarmkrebs mit dreifach höherer Wahrscheinlichkeit. Dafür dürften mehrere Vorgänge verantwortlich sein. Zum einen schädigt der Alkohol im Blut selbst schon die Schleimhautzellen des Enddarms. Zusätzlich malträtiert sein giftiges Abbauprodukt Acetaldehyd die Erbsubstanz der Zellen. Offenbar „verdauen“ im Enddarm lebende Bakterien Alkohol, der aus dem Blut in den Enddarm diffundiert, zum giftigen Acetaldehyd. Und auch dort werden Krebs erregende Inhaltsstoffe der Getränke wirksam, die ebenfalls im Blut zum Enddarm gelangen. Sie haben in dem Fall besonders leichtes Spiel, weil Ethanol bei stetigem Konsum dafür sorgt, dass sich diese Schleimhautzellen ungewöhnlich oft teilen. Das macht sie aber besonders empfindlich gegenüber toxischen und Krebs auslösenden Substanzen.

Weithin bekannt sind die alkoholbedingten Erkrankungen der Leber, des wichtigsten Entgiftungsorgans, das auch den Großteil des Ethanols entsorgen muss und dadurch stark belastet wird. Die Häufigkeit von Fettleber, Leberfibrose und Leberzirrhose korreliert eng mit dem täglichen Alkoholkonsum. Das Risiko steigt für Männer deutlich ab 40 bis 60 Gramm Alkohol täglich, für Frauen schon ab 20 bis 30 Gramm. Eine Fettleber kann schon nach kurzem Missbrauch entstehen, eine Leberfibrose beziehungsweise -zirrhose nach mehrjährigem Alkoholabusus. Es ist bei Männern ab 60 Gramm pro Tag sechsfach erhöht, ab 80 Gramm vierzehnfach. Frauen haben schon bei 12 Gramm Alkohol täglich, einem Glas Bier, ein höheres Risiko für eine Leberzirrhose.

Alkohol im Stoffwechsel

Alkohol wird von Magen und Dünndarm rasch nahezu vollständig absorbiert. Ein Teil wird schon in den Schleimhäuten von Magen und Darm enzymatisch abgebaut. Vom Gesamtalkohol scheiden Lungen, Nieren und Haut bis zu einem Zehntel, meist deutlich weniger, unverändert aus. Den größten Teil zersetzen die Leberzellen.

In der Leber wandelt das Enzym „Alkoholdehydrogenase“ (ADH) neunzig Prozent davon in das giftige Acetaldehyd um – dieses wird von der „Aldehyd-Dehydrogenase“ entgiftet; fast zehn Prozent des Alkohols zerlegt ein System namens „MEOS“, den Rest das Enzym „Katalase“. Solange die Leber nicht erkrankt, „vertragen“ chronische Trinker mehr, weil Blutalkoholwerte ab ein Promille das MEOS stimulieren. Dieses bildet dann besonders viele Alkohol abbauende Enzyme.

Frauen vertragen weniger Alkohol als Männer, weil bei ihnen das Enzym ADH in der Magenschleimhaut weniger aktiv ist. Außerdem besitzt jeder Mensch andere Typen von ADH. Weil den meisten Japanern eines dieser Isoenzyme fehlt, vertragen sie Alkohol schlechter als andere Populationen.

Die so genannte Flush-Reaktion – Hautrötung durch Erweiterung der Blutgefäße, Benommenheit, Kopfschmerz, Herzklopfen und Übelkeit – beruht auf dem Mangel einer Isomerform der Aldehyd-Dehydrogenase. Das betrifft jeden zweiten Asiaten des pazifischen Raumes und jeden zehnten bis zwanzigsten Europäer.

Einerseits schädigen Ethanol und sein giftiges Abbauprodukt Acetaldehyd selbst die Leberzellen. Zu den wichtigsten Ursachen für alkoholinduzierte Lebererkrankungen gehören vermutlich aber auch durch den Alkohol hervorgerufene Immunreaktionen. So scheinen Bestandteile von Darmbakterien (Endotoxine) und bestimmte Botenstoffe (Interleukine und Cytokine) an den verschiedenen Organen chronische Entzündungen hervorzurufen, die schließlich Organschäden bedingen. Hinzu kommen genetische Voraussetzungen.

Bei einer bereits vorhandenen Leberentzündung wie einer chronischen Hepatitis beschleunigt Alkohol deren Verlauf. Das gilt insbesondere für die Hepatitis-C-Infektion, aus der oft eine Zirrhose und später Leberkrebs entsteht. Schon bei mehr als zehn Gramm Alkohol pro Tag vermehrt sich das Hepatitis-C-Virus deutlich schneller. Die Patienten müssen ganz auf Alkoholika verzichten. Bei einer ausgeheilten Hepatitis-B-Infektion ohne bleibenden Gewebeschaden muss man nicht ganz so vorsichtig sein. Zur Zeit haben allein in Deutschland rund 1,4 Millionen Menschen eine chronische Hepatitis, davon etwa 600 000 eine Hepatitis-C („Hepatitis C: Die stille Volksseuche“, Spektrum der Wissenschaft 3/2000, S. 28). Die Rate der jährlichen Neuinfektionen liegt bei 15 000.

Weniger bekannt ist, dass auch die Bauchspeicheldrüse Alkoholgenuss auf die Dauer oft nicht aushält. Wer täglich mehr als 80 Gramm Ethanol konsumiert, was etwa einem Liter Wein entspricht, riskiert hochgradig eine „chronische alkoholische Bauchspeicheldrüsenerkrankung“ oder „Pankreatitis“. Diese äußert sich in Schüben mit starken Bauchschmerzen. Die Drüse bildet dann ungenügend Verdauungsenzyme und zu wenig des Blutzuckerhormons Insulin, was auch erklärt, wieso Alkoholmissbrauch oft Diabetes nach sich zieht. Vorwiegend Männer mittleren Alters sind von der alkoholbedingten Bauchspeicheldrüsenentzündung betroffen. Bei ihnen manifestiert sich das Leiden klinisch im Mittel nach siebzehn, bei Frauen nach zehn trinkfreudigen Jahren. Offenbar ist nicht die Art des Getränks, sondern die absolute tägliche Alkoholmenge entscheidend. Als Risikodosis gelten schon zwanzig Gramm am Tag, aber auch weniger scheint nicht mit Sicherheit unbedenklich zu sein. Eine untere Schwellendosis ist nicht nachzuweisen.

Wieso entzündet sich die Bauchspeicheldrüse? Möglicherweise bildet sie ein zu dickflüssiges Sekret, weil der Alkohol bewirkt, dass die Abgabe von Wasser und Bikarbonat sinkt, die der Proteine (Verdauungsenzyme) aber gesteigert wird und auch die Konzentration von Calcium im Sekret ansteigt. Nun entstehen Calcium-Kristalle und Proteinablagerungen. Dadurch würden die kleinen Ausführungsgänge der Bauchspeicheldrüse mit der Zeit verkalken und verstopfen. Auch könnten Enzyme aus den Gängen in das umgebende Drüsengewebe übertreten, denn Alkohol macht deren Wände durchlässiger. Die Folgen: Entzündungen, Selbstverdauung von Teilen des Organs und Umbau des Drüsengewebes in Bindegewebe. Letzteres, „Fibrose“ genannt, kann schließlich die gesamte Bauchspeicheldrüse erfassen. Neuere Befunde lassen überdies annehmen, dass der Alkohol direkt die Zellen schädigt, welche die Verdauungsenzyme bilden.

Anstieg des Krebsrisikos

Um so viel steigert nur ein „Drink“ (10 Gramm Alkohol) täglich die Krebsgefahr

Organ	Anstieg
Mundhöhle	30 %
Rachen	30 %
Kehlkopf	30 %
Speiseröhre	30 %
Leber	20 %
Brustdrüse	10 %
Dickdarm	5 %
Enddarm	5 %

Eine chronische Bauchspeicheldrüsenentzündung bedeutet ein erhöhtes Risiko für Bauchspeicheldrüsenkrebs. Der Alkohol löst den Krebs zwar nicht direkt selbst aus, fördert ihn wegen der Entzündung aber indirekt.

Immer wieder verlautet, dass alkoholische Getränke in Maßen dem Herzen und den Gefäßen gut tun. Doch sie können dem Herz-Kreislauf-System auch sehr schaden. Wohl senkt geringer bis mäßiger Konsum nachweislich das Herzinfarkt- und Schlaganfallrisiko etwas. Doch dies gilt nur mit Einschränkungen (siehe auch Kasten Seite 66). So scheinen dank regelmäßigen Alkoholkonsums nur solche Hirninfarkte seltener zu werden, die wegen arteriosklerotischer Gefäßverengungen auftreten. Schlaganfälle durch Gefäßblutungen („platzende Äderchen“) vermindern sich nicht. Auch wirken nur bis zu vierzehn Gramm Ethanol pro Tag schützend. Ab vierzig Gramm steigt das Schlaganfallrisiko sogar. Und gelegentliche Besäufnisse erhöhen die Gefahr generell, auch wenn die Person sonst wenig trinkt.

Gefahr für Herz und Blutdruck

Das Risiko einer koronaren Herzerkrankung und in letzter Konsequenz des Herzinfarkts scheint dagegen durch Alkohol auch geringer zu werden, wenn jemand ziemlich viel trinkt. Der Effekt ist von der Art des Getränks unabhängig, gilt also nicht nur für Rotwein. Alkohol sorgt für mehr günstige und weniger ungünstige Blutfette (sprich Cholesterin). Die Mediziner vermuten, dass Alkohol das Blut „geschmeidiger“ macht, deswegen weniger Gefäßverkalkungen auftreten und das Blut nicht so schnell gerinnt. Der Effekt ist ähnlich wie der von Aspirin, das Herzkranke zur „Blutverdünnung“ erhalten. Er liegt auch in einer ähnlichen Größenordnung: Er senkt das Risiko um etwa ein Drittel. Besonders im Rotwein scheinen außerdem phenolische Inhaltsstoffe schützend zu wirken. Die Phenole senken auch den Blutdruck, weil sie die Gefäße erweitern.

Stärkeren Alkoholkonsum kann das Herz auf Dauer dennoch nicht verkraften. Ethanol wirkt auf die Herzmuskelzellen giftig. Ein chronischer Missbrauch belastet das Organ dadurch so stark, dass es sich erweitert und eine behandlungsbedürftige Herzschwäche entsteht. Auch Herzrhythmusstörungen treten oft auf.

Patienten mit Bluthochdruck – Hypertoniker – sollten möglichst auf Alkohol verzichten, denn die Droge erhöht den Blutdruck. Oft verbessern sich die Werte schon, wenn jemand weniger trinkt. Männer müssen ab dreißig Gramm Alkohol täglich, Frauen ab zwanzig Gramm, mit messbar erhöhtem Blutdruck rechnen.

Bei jedem Alkoholexzess gehen Millionen von Hirnzellen direkt an der Vergiftung zugrunde. Sie werden offenbar nicht wieder ersetzt. Das Gehirn eines Alkoholikers verliert deswegen mit den Jahren merklich an Masse. ▶



STEPHAN TEYSSEN

Bei häufigem Alkoholkonsum entarten die Schleimhautzellen im unteren Abschnitt der Speiseröhre besonders leicht.

Darunter leiden auch die Gehirnfunktionen. Hinzu kommen Schädigungen von anderen Teilen des zentralen und des peripheren Nervensystems. Die Ärzte diagnostizieren dann charakteristische neurologische Funktionsstörungen. Sie reichen von Wahrnehmungsverlusten und Gedächtniseinbußen über Störungen der Bewegungskoordination bis zu übermäßiger Druckempfindlichkeit, Muskellähmungen und gefühllosen Hautpartien.

Tragisch und erschreckend ist, dass werdende Mütter das Ungeborene durch Alkohol nachhaltig schwer schädigen können. Im Blut des Kindes erreicht die Droge rasch die gleiche Konzentration wie in dem der Mutter. Der kindliche Organismus verfügt aber noch kaum über Entgiftungsmechanismen, ist den Giften darum völlig ausgeliefert. Die toxischen Substanzen schädigen Zellen und behindern verschiedenste Wachstums- und Differenzierungsprozesse. Die Neugeborenen haben oft Untergewicht und wachsen auch später schlechter als gesunde Kinder. Sie weisen häufig am Skelett und an verschiedenen Organen Fehlbildungen auf, so an Herz, Nieren oder den Genitalien. Typisch sind auch ein zu kleiner Hirnschädel, Augenfehler und auffällige Gesichtsbildungen. Vielfach sind diese Kinder mehr oder minder schwer geistig behindert. In der ersten Zeit der Schwangerschaft ist die Gefahr durch Alkohol für das Kind am größten, weil sich dann seine Organe, darunter auch das Gehirn, entwickeln und die Zellen sich besonders oft teilen und in eine bestimmte Richtung entwickeln müssen. Leider haben Frauen jedoch nach der Empfängnis gewöhnlich keine Aversion gegen Alkoholika.

Die meisten körperlichen Fehlbildungen bei Neugeborenen gehen auf den Alkohol selbst und seine Abbauprodukte, besonders das giftige Acetaldehyd, zurück. Jedes dreihundertste Neugeborene ist davon betroffen. Noch mehrfach häufiger sind leichtere Hirnschäden und komplexe Hirnfunktionsstörungen. Abgesehen von Erbdefekten gehört Alkohol damit zu den bedeutendsten Ursachen geistiger Entwicklungsstörungen.

Offensichtlich stellt die von der Mutter getrunkene Alkoholmenge kein Maß dafür dar, ob und wie gravierend die Schäden beim Kind sind. Nach bisherigen Befunden existiert auch kein unbedenklicher unterer Grenzwert. Nachgewiesen wurde aber: Wenn die Schwangere täglich 29 Gramm Alkohol trinkt, vermindert dies die Intelligenz des Kindes irreversibel um durchschnittlich sieben IQ-Punkte. Nur die anfängliche Hyperaktivität verliert sich im Laufe der Zeit. Fast jedes zweite betroffene Kind kann nur eine Sonderschule besuchen; keines erreicht die Oberschulreife, und nur wenige gelangen in einen qualifizierteren Beruf. Lediglich etwa jedes neunte kann später selbstständig leben und eine Familie gründen.

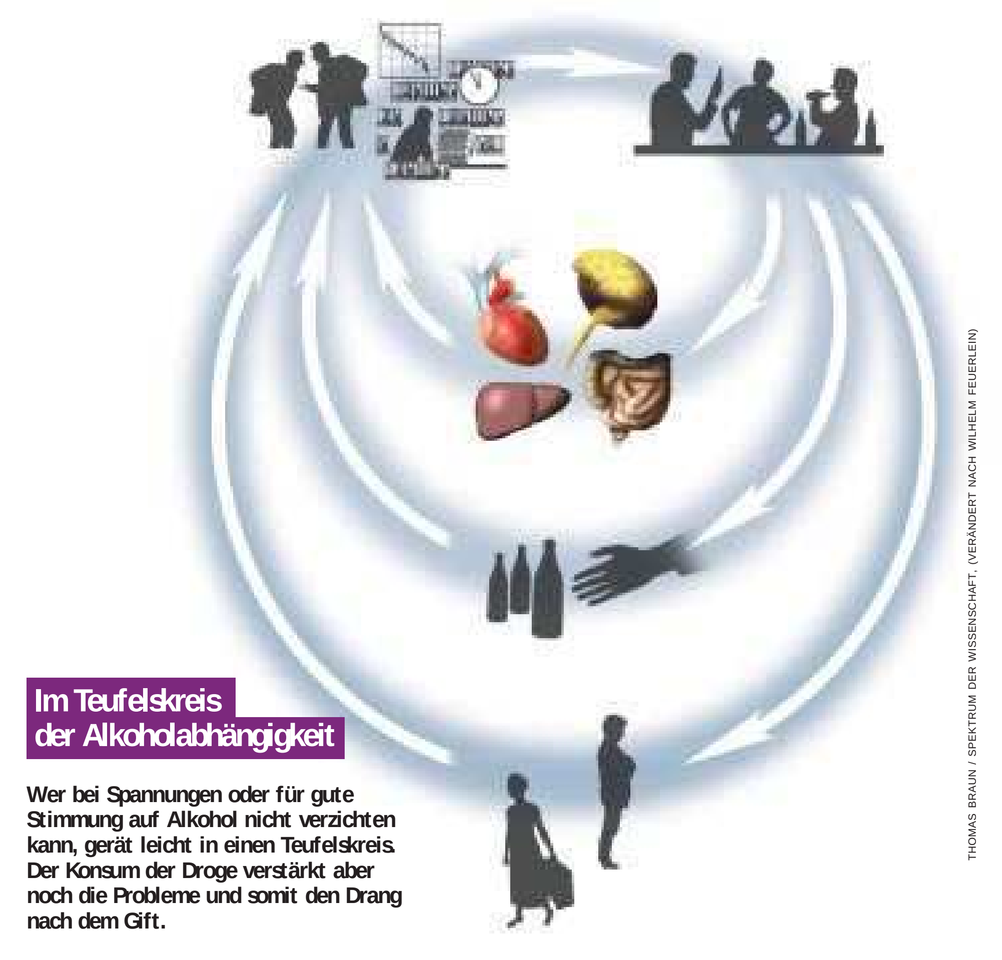
Fatalerweise werden rund ein Drittel dieser jungen Menschen später alkoholsüchtig oder von anderen Drogen abhängig. Denn im Embryo und Fötus fördern Ethanol und sein Abbauprodukt Acetaldehyd eine spätere Disposition für Sucht.

Genuss mit Schattenseiten

Wieso ist Alkohol trotz der Schäden, die er verursacht, so beliebt? Warum wird in der westlichen Welt sogar immer mehr davon konsumiert? Die Hintergründe sind zwar nicht völlig geklärt. Doch dürften hierbei viele Faktoren zusammenwirken. Sicher spielt dabei mit, dass Alkohol beruhigt, die Stimmung aufhellt, Stress dämpft, Angst löst. Menschen, die fast täglich ein oder zwei Glas trinken, fühlen sich nach Umfragen zufriedener und subjektiv auch gesünder als Personen, die Alkohol weitgehend meiden. Erstere neigen offenbar auch weniger zu depressiven Verstimmungen als Letztere, übrigens auch weniger als starke Trinker. Bei älteren Menschen soll Alkohol die geistige Leistungsfähigkeit vorübergehend verbessern.

Medizinisch gesehen wäre moderates Trinken der Konsum einer nicht schädlichen Menge Alkohols. Die Schwelle zum Missbrauch aus medizinischer Sicht ist aber individuell sehr verschieden und darum nicht festlegbar, weswegen sich allgemeine Empfehlungen verbieten. Überdies verstehen die einzelnen Kulturkreise unter mäßigem Trinken durchaus Verschiedenes. Das schwankt zwischen 3 und mehr als 150 Gramm, so viel wie in zwei Litern Wein. Diese Menge schadet mit Sicherheit Herz und Kreislauf. Sogar hier zu Lande variieren die Angaben für untere Grenzwerte erheblich, zwischen 17 und 40 Gramm täglich für Männer und 12 bis 20 Gramm für Frauen. Neuere epidemiologische Studien belegen, dass das Krankheitsrisiko schon oberhalb dieser unteren Grenzwerte steigt.

Wie der Körper unmittelbar auf Alkoholkonsum reagiert, hängt im Einzelfall nicht nur von der Alkoholmenge ab. Von anderen Erkrankungen abgesehen wirken sich auch Vorerfahrungen mit der Droge und die pharmakologische Toleranz des Betreffenden aus – die individuell verschieden ist und bei regelmäßigem Konsum zunächst steigt. Wichtig sind auch Stimmung und Umgebung. So funktioniert die Stressdämpfung nicht bei allen Menschen gleich stark. Besonders effek-



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, (VERÄNDERT NACH WILHELM FEUERLEIN)

Im Teufelskreis der Alkoholabhängigkeit

Wer bei Spannungen oder für gute Stimmung auf Alkohol nicht verzichten kann, gerät leicht in einen Teufelskreis. Der Konsum der Droge verstärkt aber noch die Probleme und somit den Drang nach dem Gift.

tiv können diese Wirkung von Alkoholika offenbar solche Personen nutzen, in deren Familie man mit geistigen Getränken seit je kontrolliert umgeht. Menschen, die mäßig, aber fast täglich trinken, scheinen mit belastenden Lebensereignissen besser umgehen zu können und in der Selbsteinschätzung ihrer Gesundheit zufriedener zu sein als Abstinente oder unbeherrschte Trinker. Solche günstigen Wirkungen bedürfen freilich noch der Bestätigung.

Dagegen stehen allerdings gut dokumentierte unerwünschte psychische Effekte eines mäßigen Alkoholgenusses. So besteht bei dauerhaftem moderatem Konsum zumindest für Männer die Gefahr, dass sich mit der Zeit Depressionen einstellen. Bei übermäßigem Konsum gilt dies für beide Geschlechter.

Der individuelle Konsum hängt aber auch mit dem soziokulturellen Hintergrund, mit Umwelteinflüssen und Verhaltensnormen zusammen – samt Anreizen und Möglichkeiten, Alkohol zu erwerben. Großen Einfluss hat die familiäre und berufliche Situation. Und nicht zuletzt spielen die genetische Veranlagung und die Stoffwechsellage eine Rolle dabei, wie jemand physiologisch und psychisch, momentan und langfristig auf Alkohol reagiert und wie leicht er eine Sucht entwickelt. Familien-, Zwillings- und Adoptionsstudien erweisen eindeutig eine genetische Prädisposition für die Alkoholkrankheit. Belegt ist auch, dass genetische Faktoren bei der Entwicklung des individuellen Trinkmusters mitwirken. Männer, die Alkoholmissbrauch betreiben, unterliegen vor allem Umwelteinflüssen der Kindheit und Jugend. Das Konsumprofil von Frauen wird dagegen zunächst hauptsächlich genetisch, erst mit zunehmendem Alter immer mehr durch Umweltbedingungen reguliert.

Eine Alkoholsucht bahnt sich gewöhnlich allmählich an. Die Grenze ist meist schwer zu ziehen – doch schätzungsweise jeder siebte Mensch, der regelmäßig Alkoholika trinkt, befindet sich bereits in einem Frühstadium der Abhängigkeit. Das erhellt auch die Verantwortung der Mitmenschen, die zum Trinken am Arbeitsplatz oder in gemütlicher Runde animieren. Doch die Betroffenen selbst und ihre Umgebung pflegen die ersten Warnsignale in der Regel zu verleugnen.

Schmaler Grat zur Abhängigkeit

Mediziner unterscheiden bei der Entwicklung von Alkoholsucht vier Phasen: Den Anfang macht der häufige Drink zwischendurch zur Belebung, Beruhigung oder Erleichterung. Bedenklicher wird es schon, wenn jemand heimlich trinkt, sich Alkoholvorräte anlegt, öfter wegen zu viel Trinkens Erinnerungslücken hat. Die „kritische Phase“ ist dann eingetreten, wenn der Mensch den Konsum nicht mehr begrenzen kann, auch, wenn er vergeblich versucht, mit dem Trinken ganz aufzuhören. Oft kann er nun seine Arbeit nicht mehr gut bewältigen. Seine Interessen engen sich immer mehr ein, er denkt nur noch an den nächsten Drink. In der „chronischen Phase“ schließlich wird der Patient auch körperlich immer hinfälliger. Er ist oft betrunken, mitunter tagelang, „verträgt“ dabei Alkohol immer weniger, denn die Leber ist schon schwer geschädigt. Er leidet auch unter schweren körperlichen Folgeschäden, bis zum Delir mit Bewusstseinstrübungen, Halluzinationen und Wahnvorstellungen. Schwer Alkoholabhängige neigen auch zu anderen psychischen Erkrankungen, etwa zu Depressionen und Angstzuständen. Häufig besteht erhöhte Selbstmordgefahr.

Doch nicht jeder, der viel Alkohol konsumiert, also Missbrauch betreibt, ist abhängig, d. h. „süchtig“. Wahrscheinlich spielt dabei auch eine Veranlagung mit. Manche Menschen werden trotz starken Konsums über Jahre nicht körperlich abhängig. Nach den Verhaltens- und Reaktionsmustern unterscheiden Mediziner mehrere Arten des Missbrauchs. Der amerikanische Arzt Elvin Morton Jellinek (1890–1963) unterschied vor vierzig Jahren fünf Typen von Alkoholikern:

➤ Der Alpha-Typ „ertränkt“ mit dem Alkohol Probleme und Konflikte. Psychisch sind diese Personen zwar abhängig, körperlich aber nicht. Sie könnten im Prinzip jederzeit zu trinken aufhören.


HERMANN LÖSER

Kinder, die vor der Geburt Alkohol ausgesetzt waren, sind in ihrer Entwicklung oft schwer beeinträchtigt. Dieses behinderte Kind zeigt einige typische Missbildungen von Mund und Augen.

➤ Der Beta-Typ, der „Gewohnheitstrinker“, trinkt bereits immerhin so viel und oft, dass ihm dies körperlich schaden kann, ist aber nicht körperlich abhängig, d. h., leidet bei Abstinenz nicht an körperlichen Entzugssymptomen. Diese Personen trinken regelmäßig über den Durst.

➤ Der Gamma-Typ ist süchtig nach Alkohol, d. h. psychisch und körperlich abhängig. Wenn er länger keinen Alkohol trinkt, leidet er auch körperlich. Nach dem ersten Schluck trinkt er weiter bis zum Rausch – er verliert die Kontrolle über den Konsum.

➤ Der Delta-Typ ist der „Spiegeltrinker“. Er „braucht“ stets einen gewissen Alkoholspiegel. Andernfalls leidet er unter körperlichen Entzugssymptomen.

➤ Der Epsilon-Typ ist der „Quartalssäufer“, der sich in Abständen, dann tagelang und bis zur Besinnungslosigkeit, betrinkt. Er ist psychisch abhängig und kann, einmal angefangen, nicht wieder aufhören.

Nicht Alkoholismus an sich, sondern eigentlich der Missbrauch jeder Art mit seinen gesundheitlichen, sozialen und volkswirtschaftlichen Auswirkungen stellt für die Gesellschaft das größere Problem dar. Trunkenheit und Trunksucht verursachen große ökonomische Verluste durch Krankheit, Arbeitsunfähigkeit, Verkehrsunfälle und Straftaten, ganz abgesehen von den körperlichen und seelischen Schäden bei den Opfern und ihren Angehörigen. Rund ein Drittel der Gewalttaten in der Familie geschehen unter Alkoholeinfluss. Auch in anderer Weise leidet das soziale Umfeld von Trinkern. In der Bundesrepublik dürften fünf bis sieben Millionen Menschen in enger Gemeinschaft mit einem Alkoholiker leben. ▶

Literaturhinweise

Alkohol und Alkoholfolgekrankheiten. Grundlagen – Diagnostik – Therapie. Von Manfred V. Singer und Stephan Teyssen (Hg.). Springer, 1999.

Lehrbuch der Suchterkrankungen. Von M. Gastpar, K. Mann und H. Rommelspacher (Hg.). Thieme, 1999.

Adressen

Deutsche Hauptstelle gegen die Suchtgefahren (DHS), 59003 Hamm, PF 1369, Westring 2, Tel. 02381/9012-0

Österreich: Zentralstelle zur Bekämpfung des Alkoholismus. A–1150 Wien, Hackengasse 13.

Schweiz: Schweizerische Fachstelle für Alkohol- und andere Drogenprobleme. CH–1003 Lausanne, Av. Ruchonnet 14. Tel.: 021/3212911

Weblinks unter: ***www.wissenschaft-online.de/spektrum/***

Alkohol: Kein Arzneimittel

Alkoholische Getränke gehören zwar für viele von uns wie selbstverständlich zum Leben. Doch wäre es völlig falsch, sich das tägliche Glas Wein oder Bier aus Gesundheitsgründen selbst zu „verordnen“. Denn Alkohol ist kein Medikament, sondern ein Gift. Darüber kann auch einseitige Werbung nicht hinwegtäuschen. Die Wirkung von Alkoholika bleibt ambivalent, auch die von Wein, selbst wenn etwa die Weinindustrie für den Konsum mit eingängigen Slogans wirbt wie: „Die frohe Botschaft vom gesunden Wein!“ oder: „Das tägliche Gläschen Wein schützt Herz und Kreislauf!“

Unsere Gesellschaft lehnt nur den Missbrauch von Alkohol, etwa Trunkenheit oder Sucht, ab. Wenn Ärzte und Wissenschaftler betonen, dass bereits mäßiges Trinken aus Geselligkeit gesundheitsschädlich sei, werden sie deswegen leicht als Schwarzmaler und Spielverderber angeprangert. Die Verantwortung für Alkoholfolgeschäden wird bei uns noch immer dem einzelnen aufgelastet. Werbung für geistige Getränke gilt hingegen als marktkonform. In diesem Widerspruch ist der Verbraucherschutz gefragt. Die Bundesrepublik hat deswegen bereits vor einigen Jahren eine Studie „Alkoholkonsum und Krankheiten“ in Auftrag gegeben, die kürzlich in der Schriftenreihe des Bundesministeriums für Gesundheit erschien. Deren Ergebnisse widersprechen deutlich den Werbeaussagen der Getränkehersteller.

Was wäre gesundheitlich das „rechte Maß“, was ein Zuviel? Allgemeine Empfehlungen dazu verbieten sich aus medizinischer Sicht, denn jeder Mensch reagiert hierin individuell. Genetische Prädispositionen etwa oder die Suchtneigung sind allzu verschieden. Das gilt auch für Umweltfaktoren. So schwanken denn auch die Angaben nach epidemiologischen Studien, wie viel Alkohol gesundheitlich noch einigermaßen unbedenklich sein, um mehr als hundert Prozent. Gesicherte Daten über eine gesundheitsfördernde Wirkung liegen nur sehr wenige vor, und meistens berücksichtigen die entsprechenden Studien nur das Herz-Kreislauf-System. Tatsächlich scheint ein geringer bis mäßiger Alkoholkonsum das Herzinfarkt- und Schlaganfallrisiko herabzusetzen. Dies gilt offenbar aber nur für Menschen über fünfzig und auch nur, solange andere Risikoerkrankungen wie Herzrhythmusstörungen, Bluthochdruck oder beispielsweise Stoffwechselstörungen nicht vorliegen.

Alle anderen Organe und Organsysteme dürfte Alkohol bereits bei mäßigem Trinken wahrscheinlich eher schädigen. Entgegen früheren Annahmen wächst etwa das Risiko für mehrere Krebsarten auf das Doppelte, wobei Rauchen ein Übriges tut. Auch Leberschäden werden häufig schon durch viel geringere Mengen Alkohol verursacht als früher angenommen. Alkohol erhöht den Blutdruck. Schwangere sollten gar keine Alkoholika trinken, weil schon wenig davon die körperliche und geistige Entwicklung des Fötus und des Kindes beeinträchtigen kann.

Gezielte, wirklich relevante und vergleichbare Forschungen, vor allem auch Langzeitstudien, über die Auswirkungen des regelmäßigen Trinkens kleinerer Mengen Alkohols fehlen weitgehend. Die vorhandenen Aufstellungen berücksichtigen zudem nur selten andere ebenfalls einflussreiche Faktoren der Lebensweise, sei es Ernährung, körperliche Aktivität oder Rauchen.



Die Statistiken führen oft nur an, um wie viel das Trinken die Lebenszeit verkürzt. Solche Zahlen beschönigen die wahren Verhältnisse im Grunde. Wie stark Alkohol die Gesellschaft und das Gesundheitssystem tatsächlich belastet, wird erst deutlich, wenn man Krankenzeiten und Behinderungen berücksichtigt. Auch die Schädigung des sozialen Umfeldes, ob Angehörige oder Unfallopfer, ist oft erheblich.

Wer die positiven gesundheitlichen Auswirkungen von moderatem Alkoholkonsum herausstellt, sollte ehrlicherweise die negativen dagegenhalten. Auf jeden Fall belegt die Forschung nicht, dass Alkohol die Gesundheit fördert, nicht einmal in kleinen Mengen. Bestenfalls mindert er ein paar Erkrankungsrisiken. Im Ganzen aber überwiegen die schädlichen Folgen.

Medizinisch und epidemiologisch gesicherte Empfehlungen, wie viel Alkohol jemand unbedenklich trinken kann, sind derzeit nicht möglich. Fest steht: Je weniger, umso besser. Täglich höchstens zehn Gramm Alkohol – ein halbes Glas Wein – für Frauen und nicht mehr als zwanzig Gramm für Männer halten Mediziner nach neueren Erkenntnissen für geboten, also halb so viel wie noch vor wenigen Jahren. Offenbar birgt der Konsum immer ein gesundheitliches Risiko: Das steigt zwar mit der Menge, ist aber schon bei einem täglichen Glas Wein oder Bier vorhanden.

Wieso manche Menschen süchtig werden und andere nicht, verstehen Mediziner inzwischen teilweise. Der Arzt Wilhelm Feuerlein, der am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München arbeitete, hat 1998 mit einem Modell drei große ursächliche Faktorengruppen herausgestellt, die sich gegenseitig beeinflussen und verstärken können – und denen der Betroffene dann allein nicht mehr auszuweichen vermag. Nach diesem Modell besitzt Alkohol erstens ein großes Suchtpotenzial. Er verändert Nervenzellsignale im Gehirn, auch besonders in Zentren, die den Umgang mit Emotionen steuern. Eben das kann bei manchen Menschen dauerhafte Verschiebungen der neuronalen Erregungsmuster auslösen. Dazu kommen zweitens spezifische körperliche und psychische Eigenschaften des Konsumenten, die genetisch und lebensgeschichtlich geprägt sind. Drittens wirken sich Besonderheiten des Umfeldes aus. Sie reichen von den allgemeinen soziokulturellen und sozioökonomischen Einflüssen bis zu Merkmalen des individuellen Kleinraumes, also vornehmlich von Familie, Arbeitswelt, Wohnqualität und wirtschaftlicher Situation.

Sucht nach Wohlbefinden

„Die Begierde nach häufiger Trunkenheit ist eine durch die chemische Natur der alkoholischen Getränke hervorgerufene Krankheit.“ So äußerte sich 1788 der schottische Arzt Thomas Trotter (1760–1832). Was geschieht dabei im Gehirn?

Unser Gehirn verfügt offenbar über ein „Wohlbefindlichkeitssystem“, das eng mit unseren Motivationen verknüpft ist. Manchmal wird es auch „Belohnungssystem“ genannt. Es hilft uns, Verhalten anzustreben, das Wohlbefinden bewirkt. Dieses System ist weit verzweigt und weist auch Ausläufer in vordere Gehirnbereiche auf. Die Stimmungsaufhellung durch Alkohol scheint zu Stande zu kommen, weil dann bestimmte Bahnen aktiviert werden, die „Endorphine“ freisetzen, körpereigene Opiate. (Ihren Namen erhielten sie, weil Morphin und andere Opiate an ihrer Stelle mit den Nervenzellen kommunizieren können.)

Dieser Vorgang kann sich offenbar „einschleifen“. Wiederholte Drogengabe sensibilisiert das Wohlbefindlichkeitssystem für die betreffende Substanz: Es reagiert nun auf die gleiche Alkoholmenge stärker. Auch setzen sich bestimmte Verhaltensmuster fest. Außerdem wird dieses System später schon im Vorfeld des Drogenkonsums aktiviert. Als Anstoß genügt etwa schon, zufällig an der Stammkneipe vorbeizukommen oder einen

Trinkkumpan zu treffen. Unangenehme Erinnerungen aktivieren das System ebenfalls: Auch sie motivieren deswegen zum Alkoholkonsum.

Einen Alkoholentzug bewertet dieses System offenbar negativ. Der Entzug erzeugt deswegen starke Angst, die der Süchtige nach allen Kräften und mit allen Mitteln zu beheben versucht. Auch hierbei scheint eine Art Lerneffekt mitzuwirken: Mit wiederholten Entzügen wird diese Angstreaktion stärker.

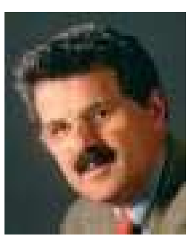
Mit dem Wohlbefindlichkeitssystem sind verschiedenste Signalstoffe verknüpft. An zentraler Stelle steht der Botenstoff Dopamin. Weil viele der molekularen Prozesse schon recht gründlich erforscht sind, können heutzutage chemische Substanzen entwickelt werden, die dem Alkoholiker bei seinem Ringen nach Abstinenz helfen. Im Fachjargon heißen diese Alkoholentwöhnungsmittel „Anti-Craving-Medikamente". Weil sie das Wohlbefindlichkeitssystem ansprechen, vermindern sie die Entzugssymptome und erleichtern es dem Patienten, einen Rückfall zu vermeiden. Diese Medikamente unterdrücken auch das Verlangen nach der Droge.

Nur etwa jedem zwanzigsten Alkoholiker gelingt es ohne Behandlung, abstinent zu leben. Eine fachlich gestützte Entwöhnung dagegen ist im Durchschnitt erfolgreicher als allgemein angenommen. Ob der Entzug ambulant erfolgen kann oder in einer Klinik durchgeführt werden muss, hängt vom Krankheitsstadium ab.

Nach der körperlichen Entgiftung, die einige Tage bis einige Wochen dauern kann, beginnt die eigentliche psychische Umgewöhnung, die sich über Monate hinzieht. Besonders in den ersten Wochen sind die Patienten extrem rückfallgefährdet. Jede Therapie muss darauf abzielen, die Motivation zum Trinken abzubauen und den Wunsch zur Abstinenz zu stärken. Dass der Patient seine Krankheit als solche einsieht, die Ursache seiner Abhängigkeit begreift und seine Einstellung zum Alkohol grundlegend überdenkt, ist dabei ebenso wichtig wie der Aufbau spezifischer Abwehrmechanismen gegen das Trinken. Der Unterstützung aus dem sozialen Umfeld kommt dabei große Bedeutung zu. Erheblich wirken in diesem Prozess auch die Angst vor Sanktionen wie Führerscheinentzug, Trennung vom Partner oder Verlust des Arbeitsplatzes mit.

Beim Entzug bestehen die besten Aussichten, wenn der Patient nach der Entgiftung in einer Klinik mindestens für mehrere Monate in psychotherapeutischer Behandlung bleibt. In schweren Fällen empfiehlt es sich, den Patienten zunächst eine Zeit lang in einer entsprechenden Einrichtung stationär zu betreuen und ihn dann unbedingt ambulant weiter zu unterstützen. Bis zu jedem zweiten schwer Trunksüchtigen gelingt es unter diesen Voraussetzungen, langfristig dem Alkohol zu entsagen.

Eine stationäre Rückfallvorsorge erfährt pro Jahr in Deutschland aber nur ungefähr jeder hundertste Alkoholabhängige. Das ist nur ein kleinerer Teil von den zweieinhalb Prozent der Alkoholkranken, die einmal oder mehrfach jährlich entgiftet werden. In Beidem, besonders aber bei der Nachbehandlung, besteht also hier zu Lande ein erhebliches Defizit.

Stephan Teyssen *und* **Manfred V. Singer** *erforschen alkoholbedingte Erkrankungen innerer Organe. Teyssen (oben) habilitierte sich 1998 im Fach Innere Medizin. Er arbeitet seit 1990 – seit 1998 als Oberarzt – an der damals neu gegründeten IV. Medizinischen Universitätsklinik am Universitätsklinikum Mannheim, dessen Direktor Singer seit 1990 ist. Singer erhielt im selben Jahr an der Fakultät für Klinische Medizin Mannheim der Universität Heidelberg den Lehrstuhl für Innere Medizin.*

Dringend erforderlich sind deshalb neue Behandlungskonzepte. Die ärztliche Versorgung muss gemeindenah sein, sofort nach der Klinikbehandlung einsetzen und vom Hausarzt in Zusammenarbeit mit einem Suchttherapeuten geleistet werden können. Die Ärzte benötigen dazu eine besondere Schulung. Doch die Fort- und Weiterbildung in Suchtmedizin liegt sehr im Argen. Begrüßenswert ist darum, dass vor zwei Jahren am Mannheimer Zentralinstitut für Seelische Gesundheit der Universität Heidelberg der erste deutsche Lehrstuhl für Suchtforschung eingerichtet wurde – ein erster Schritt, um dem Defizit zu begegnen. Der erste Inhaber des Lehrstuhls Karl Mann fordert, dass leichter abhängige und weniger geschädigte Alkokolkranke neben der ambulanten Betreuung durch den Hausarzt unbedingt an Selbsthilfegruppen teilnehmen sollten, wie den Anonymen Alkoholikern, den Blaukreuzlern oder Guttemplern. Außerdem plädiert er dafür, bei jedem Patienten zu prüfen, ob eine medikamentöse Unterstützung der Abstinenz angebracht sei, mindestens für die ersten sechs Monate nach dem Entzug.

Eine Reihe von Alkoholentwöhnungsmitteln, die das Wohlbefindlichkeitssystem des Gehirns beeinflussen, sind verfügbar. Klinischen Prüfungen zufolge scheinen vor allem Acamprosat (Campral) und Naltrexon **(**Nemexin**)** die Entzugssymptome zu vermindern und die Gefahr eines Rückfalls zu verringern. Etliche Studien zeigten, dass doppelt so viele Patienten – über vierzig Prozent – im ersten Jahr nach dem Entzug abstinent bleiben, wenn sie Acamprosat einnehmen, als wenn sie ein Scheinmedikament erhalten. Der Erfolg hält auch nach Absetzen des Medikaments an.

In der öffentlichen Aufmerksamkeit stehen die sozialen und gesellschaftlichen Folgen von Missbrauch, weniger die gesundheitlichen Gefahren bei mäßigem Konsum. Über die Wirkungen von moderatem Alkoholgenuss besteht noch viel Forschungsbedarf. Fest steht nur: Ethanol ist viel schädlicher als früher angenommen. Wenn man nur die Sterblichkeit misst, wird man der Sache nicht gerecht. Der Einfluss von Alkohol auf Behinderungen dürfte sehr viel gravierender sein als sein Einfluss auf die Sterblichkeit. Nach einer Studie der Weltgesundheitsorganisation beruhen auf Alkohol zwei Prozent der Sterblichkeit, aber dreieinhalb Prozent der Krankheiten und mehr als sechs Prozent der durch Behinderung „verlorenen" Lebensjahre. Dagegen steht die mit sehr großer Vorsicht zu interpretierende errechnete drei- bis vierprozentige Senkung der Sterblichkeit, die durch die Wirkung von moderatem Alkoholkonsum auf das Herz-Kreislauf-System erzielt werden kann. Unsere Gesellschaft hat somit ein erhebliches Alhokolproblem.

Alles in allem ist es unverantwortlich, zum Genuss alkoholischer Getränke zu animieren oder sie gar ohne Einschränkung zu propagieren. Denn Mäßigkeit ist nach den Werten zu bemessen, bei denen krankheitsvorbeugende Effekte weitgehend ausgeschöpft werden und nachteilige Konsequenzen unwahrscheinlich sind. Ein Glas dann und wann darf allenfalls der Arzt empfehlen – jenen Patienten, deren Risikostruktur er gut kennt. Risikofreies Alkoholtrinken gibt es nicht. ■

100 Jahre Quantentheorie

WILEY-VCH VERLAG, BERLIN GMBH

Planck erklärt die Schwarzkörperstrahlung (1900)

Einstein erklärt den photoelektrischen Effekt (1905)

Entdeckung der Supraleitung (1911)

TEXAS CENTER FOR SUPERCONDUCTIVITY, UNIVERSITY OF HOUSTON

Bohrs Theorie der Atomspektren (1913)

Vorhersage der Bose-Einstein-Kondensation (1924)

Paulisches Ausschließungsprinzip (1925)

Schrödinger-Gleichung; Kopenhagener Deutung (1926)

Heisenbergsches Unbestimmtheitsprinzip (1927)

Dirac-Gleichung des Elektrons (1928)

Entdeckung des Anti-Elektrons (1932)

„Schrödingers Katze"; „Einstein-Podolsky-Rosen-Paradox" (1935)

Entdeckung der Superfluidität (1938)

Atombombe (1945)

Transistor (1947)

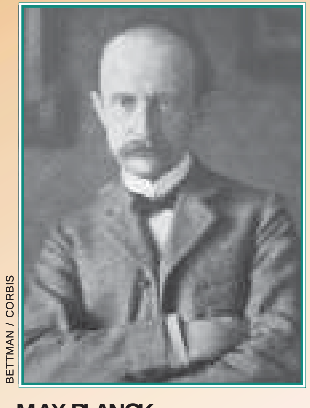
AT&T ARCHIVES

Quantenelektrodynamik und Renormierung (1948)

BETTMAN / CORBIS

1900 – 1910 | 1910 – 1920 | 1920 – 1930 | 1930 – 1940 | 1940 – 1950

Das Fundament der Quantentheorie wurde zwischen 1900 und 1927 geschaffen; vor allem die sieben abgebildeten Physiker leisteten in dieser Gründungsphase bahnbrechende Beiträge. In den hundert Jahren ihrer Entwicklung hat die Quantenphysik nicht nur unser Naturverständnis ungeheuer vertieft, sondern auch die Grundlage für zahlreiche Technologien geliefert. Dennoch sind einige fundamentale Rätsel der Quantentheorie ungelöst geblieben.



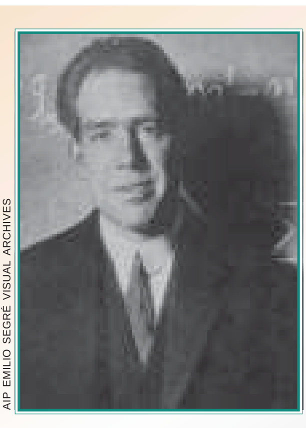
BETTMAN / CORBIS

MAX PLANCK (1858–1947)



THE ALBERT EINSTEIN ARCHIVES, HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM

ALBERT EINSTEIN (1879–1955)



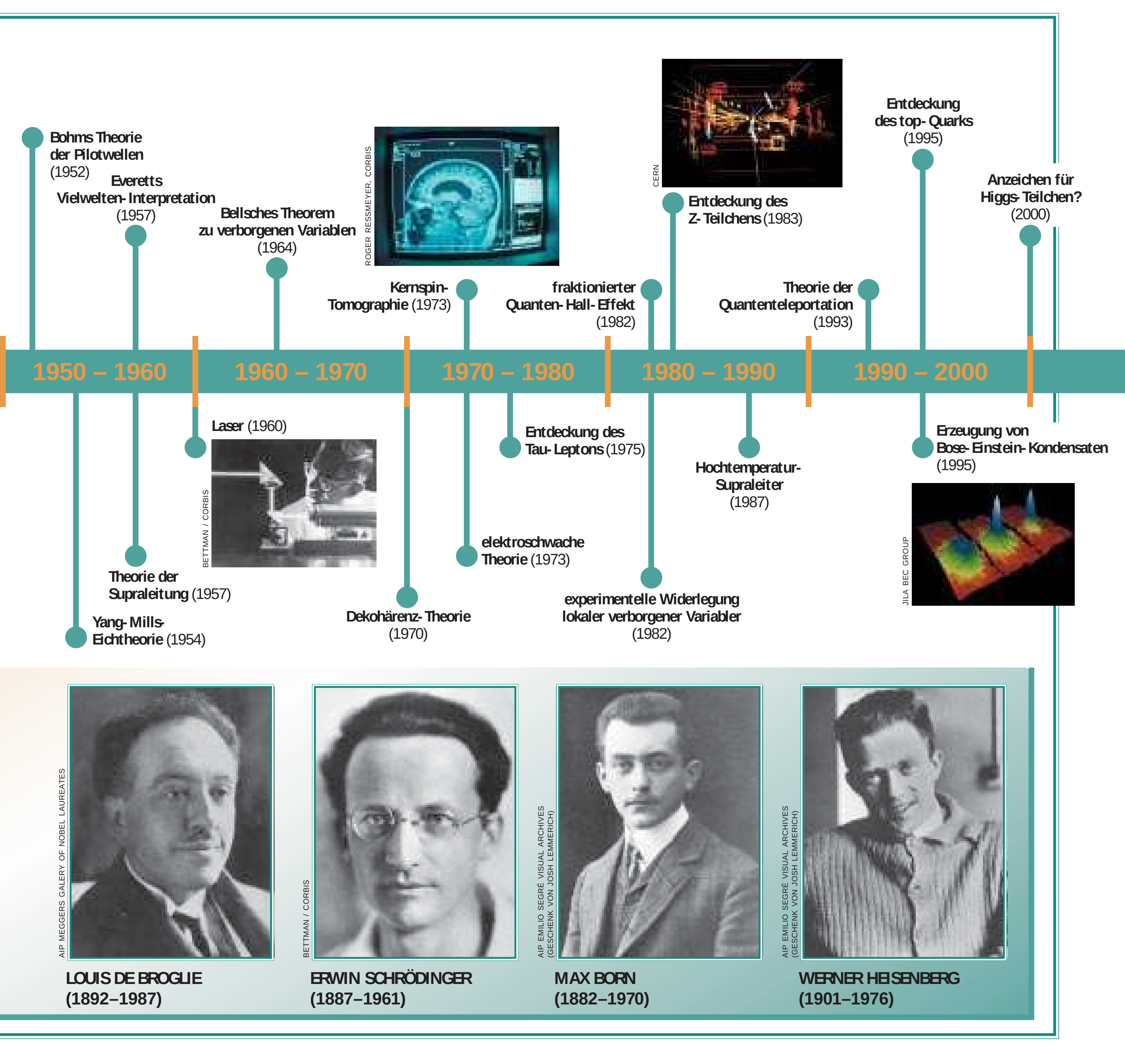
AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES

NIELS BOHR (1885–1962)

Keine physikalische Theorie ist präziser – und keine wirft zur Frage, was da eigentlich gemessen wird, ähnlich knifflige Interpretationsprobleme auf. Jetzt zeichnet sich unter dem Begriff „Dekohärenz“ eine schlüssige Lösung ab.

Von Max Tegmark und John Archibald Wheeler

Schon in wenigen Jahren werden alle fundamentalen physikalischen Konstanten annähernd bestimmt worden sein, und ... die einzige Beschäftigung, die dann den Wissenschaftlern bleibt, wird sein, diese Messungen eine Dezimalstelle weiter zu treiben.“ Während wir ins 21. Jahrhundert eintreten und stolz die Bilanz vergangener Errungenschaften ziehen, mag diese Stimmung vertraut klingen. Doch das Zitat stammt aus James Clerk Maxwells Antrittsvorlesung an der Universität Cambridge im Jahre 1871 und drückt die damals vorherrschende Meinung aus – die Maxwell übrigens nicht teilte. Drei Jahrzehnte später, am 14. Dezember 1900, trug Max Planck seine Formel für das Strahlungsspektrum schwarzer Körper vor und läutete damit die Revolution der Quantentheorie ein.



LOUIS DE BROGLIE (1892–1987)

ERWIN SCHRÖDINGER (1887–1961)

MAX BORN (1882–1970)

WERNER HEISENBERG (1901–1976)

Dieser Artikel lässt die ersten hundert Jahre Quantenphysik Revue passieren und berücksichtigt dabei besonders ihre mysteriöse Seite und die anhaltende Debatte über ihre breit gefächerten Konsequenzen – von Quantencomputern bis zum menschlichen Bewusstsein, von Paralleluniversen bis zum Wesen der physikalischen Wirklichkeit. Dabei übergehen wir die erstaunliche Bandbreite der wissenschaftlich-technischen Anwendungen: Heutzutage beruht schätzungsweise ein Drittel des Bruttoinlandsprodukts der USA auf Erfindungen, die durch die Quantenphysik ermöglicht wurden – vom Halbleiter im Computerchip über Laser im CD-Player bis zur Kernspintomographie im Krankenhaus und vielem mehr.

1871 hatten die Naturforscher gute Gründe für ihren Optimismus. Klassische Mechanik und Elektrodynamik trieben die industrielle Revolution voran, und anscheinend vermochten ihre Grundgleichungen alle physikalischen Systeme zu beschreiben. Nur ein paar lästige Details trübten das Bild. Zum Beispiel passte keine Formel auf das gesamte Strahlungsspektrum eines glühend heißen Objekts. Tatsächlich wurde die klassische Vorhersage sogar Ultraviolett-Katastrophe genannt: Ihr zufolge hätte beim Betrachten einer Herdplatte intensive Ultraviolett- und Röntgenstrahlung das Augenlicht gefährden müssen.

In seiner Arbeit von 1900 gelang Planck die Herleitung des korrekten Spektrums – allerdings um den Preis einer derart bizarren Annahme, dass er sich viele Jahre lang von ihr distanzierte: Energie werde nur in bestimmten Portionen oder „Quanten“ emittiert. Doch diese seltsame Annahme erwies sich als äußerst erfolgreich. Im Jahre 1905 trieb Einstein die Idee einen Schritt weiter. Indem er annahm, Strahlung könne Energie nur in solchen Stücken oder „Photonen“ transportieren, erklärte er den photoelektrischen Effekt, der bei den Vorgängen in heutigen Solarzellen und Bildsensoren in digitalen Kameras eine zentrale Rolle spielt.

Das rätselhafte Wasserstoffatom

Im Jahre 1911 geriet die Physik in eine weitere große Verlegenheit. Ernest Rutherford hatte überzeugend dargelegt, dass die Atome aus Elektronen bestehen, die einen positiv geladenen Kern umkreisen – ganz ähnlich einem winzigen Sonnensystem. Doch gemäß der Theorie des Elektromagnetismus müssten die umlaufenden Elektronen ihre Energie kontinuierlich abstrahlen und binnen einer billionstel Sekunde in den Kern stürzen. Natürlich sind Wasserstoffatome in Wahrheit äußerst stabil. In der Tat war diese Diskrepanz das schlimmste quantitative Versagen in der Geschichte der Physik: Die Lebensdauer von Wasserstoff wurde damit um rund vierzig Größenordnungen unterschätzt.

1913 lieferte Niels Bohr, der an die Universität Manchester gekommen war, um mit Rutherford zu arbeiten, eine Erklärung, die wiederum Quanten benutzte. Er postulierte, dass der Bahndrehimpuls der Elektronen nur bestimmte diskrete Werte annehmen darf, wodurch den Elektronen nur gewisse Bahnradien erlaubt sind. Die Elektronen können demnach nur Energie abstrahlen, indem sie aus einer solchen erlaubten Bahn zu einer niedrigeren springen und dabei ein einzelnes Photon abgeben. Weil ein Elektron auf der innersten Bahn keine Bahnen noch tieferer Energie vorfindet, auf die es springen könnte, bildet es ein stabiles Atom.

Bohrs Theorie erklärte auch viele Spektrallinien des Wasserstoffs – die spezifischen Frequenzen, die von angeregten Atomen emittiert werden. Sie funktionierte auch für das Heliumatom, aber nur, wenn das Atom eines seiner beiden Elektronen beraubt war. Nach Bohrs Rückkehr nach Kopenhagen schrieb ihm Rutherford, er müsse seine Resultate veröffentlichen. Bohr schrieb zurück, niemand würde ihm glauben, wenn er nicht die Spektren aller Elemente erkläre. Rutherford antwortete: „Bohr, Du erklärst Wasserstoff und Du erklärst Helium, und jeder wird Dir alles Übrige glauben.“

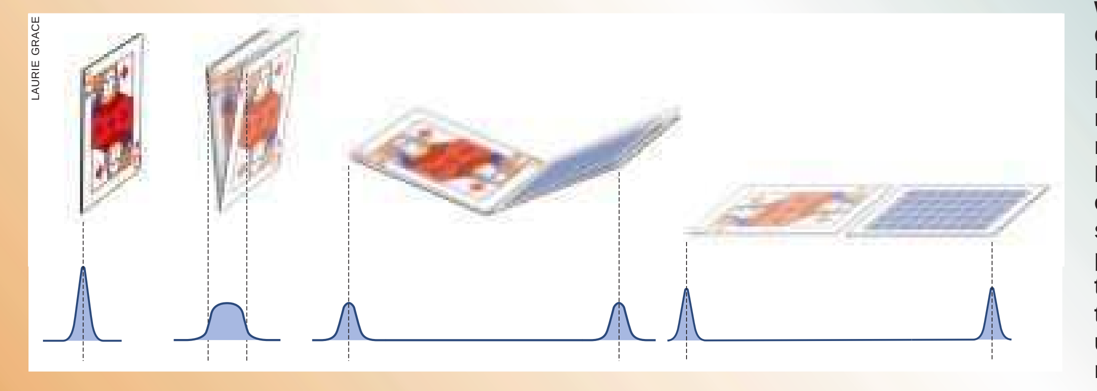
Trotz der anfänglichen Erfolge des Quantenkonzepts wussten die Physiker noch nicht, was sie von den anscheinend willkürlichen Regeln halten sollten. Es schien kein zu Grunde liegendes Prinzip zu geben. Im Jahre 1923 schlug Louis de Broglie in seiner Doktorarbeit eine Antwort vor: Elektronen und andere Teilchen verhalten sich wie stehende Wellen, die – wie die Schwingungen einer Gitarrensaite – nur mit bestimmten diskreten, das heißt quantisierten Frequenzen auftreten können. Die Idee war so ungewöhnlich, dass das Prüfungsgremium sich externen Rat holte. Als Einstein gefragt wurde, gab er ein positives Urteil ab, und die Dissertation wurde akzeptiert.

Ein Gedankenexperiment

Quantenkarten

Eine fallende Spielkarte illustriert ein Quantenrätsel

Der Quantenphysik zufolge fällt eine idealisierte Spielkarte, die hochkant ausbalanciert wurde, in beide Richtungen zugleich um: Sie bildet eine so genannte Zustandsüberlagerung oder Superposition. Die Wellenfunktion (blau) der Karte verändert sich kontinuierlich vom ausbalancierten Zustand (links) zu dem mysteriösen Endzustand (rechts), der zu besagen scheint, dass die Karte an zwei Orten gleichzeitig liegt. In der Praxis ist dieses Gedankenexperiment mit Spielkarten unmöglich, aber die analoge Situation ist mit subatomaren Teilchen und kompletten Atomen unzählige Male demonstriert worden. Die Bedeutung solcher Superpositionen ist ein hartnäckiges Rätsel der Quantenmechanik – und ebenso die Frage, warum wir in der Alltagswelt niemals etwas dergleichen sehen. Im Laufe der Jahre haben die Physiker mehrere konkurrierende Ideen zur Lösung des Rätsels entwickelt, insbesondere die Kopenhagener Deutung, die Vielwelten-Interpretation und die Dekohärenz-Theorie.



Im November 1925 hielt Erwin Schrödinger in Zürich ein Seminar zu de Broglies Arbeit ab. Nachher fragte Peter Debye: Sie sprechen über Wellen, aber wo ist die Wellengleichung? Daraufhin entwickelte Schrödinger die nach ihm benannte Gleichung und stieß damit das Tor zu einer neuen Physik auf. Ungefähr zur selben Zeit lieferten Max Born, Pascual Jordan und Werner Heisenberg eine äquivalente Formulierung mittels Matrizen. Mit dieser mächtigen mathematischen Ausstattung machte die Quantentheorie rapide Fortschritte. Binnen weniger Jahre hatten die Physiker unzählige Messungen erklärt, insbesondere die Spektren komplizierterer Atome und die Eigenschaften chemischer Reaktionen.

Kuriose Katzen und Quantenkarten

Aber was bedeutete das alles? Was war diese „Wellenfunktion“, die durch Schrödingers Gleichung beschrieben wurde? Diese zentrale Frage der Quantenmechanik bleibt bis zum heutigen Tag ein gewaltiges und heiß umstrittenes Problem.

Born erkannte, dass die Wellenfunktion über Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden sollte. Wenn die Experimentalphysiker den Ort eines Elektrons messen, hängt die Wahrscheinlichkeit, es in einem bestimmten Gebiet zu finden, vom dort gültigen Wert der Wellenfunktion ab. Dieser Interpretation zufolge enthalten die Naturgesetze ein fundamentales Element des Zufalls. Einstein war mit dieser Schlussfolgerung zutiefst unglücklich und drückte seine Vorliebe für ein deterministisches Universum mit der oft zitierten Bemerkung aus, er könne nicht glauben, dass Gott würfle.

Auch Schrödinger war nicht wohl bei der Sache. Die Wellenfunktionen können Kombinationen unterschiedlicher Zustände beschreiben, so genannte Superpositionen. Zum Beispiel kann ein Elektron als Superposition mehrerer Ortszustände existieren. Schrödinger betonte nun: Wenn mikroskopische Objekte wie einzelne Atome als seltsame Zustandsüberlagerungen existieren können, dann auch makroskopische Gegenstände, denn sie bestehen doch schließlich aus Atomen. Als drastisches Beispiel wählte er das unterdessen berühmte Gedankenexperiment, bei dem ein heimtückischer Apparat eine Katze genau dann tötet, wenn ein radioaktives Atom zerfällt. Weil das Atom eine Superposition von zerfallen und nicht zerfallen bildet, erzeugt es eine Katze, die als Überlagerung von tot und lebendig existiert.

Die Abbildung links zeigt eine simplere Variante dieses Gedankenexperiments. Man nehme eine Spielkarte mit perfekt scharfen Kanten und lasse sie hochkant auf einem Tisch balancieren. Gemäß der klassischen Physik müsste sie im Prinzip ewig in labilem Gleichgewicht bleiben. Doch gemäß der Schrödinger-Gleichung wird die Karte binnen Sekunden umfallen, selbst wenn man sie noch so gut ausbalanciert hat, und sie wird als Überlagerung in beide Richtungen fallen – nach rechts und nach links.

Könnte man dieses idealisierte Gedankenexperiment mit einer wirklichen Karte ausführen, würde man zweifellos feststellen, dass die klassische Physik falsch ist und die Karte umfällt. Aber man würde sie immer nur entweder nach links oder nach rechts fallen sehen – scheinbar ganz zufällig –, aber niemals gleichzeitig nach links und nach rechts, wie uns die Schrödinger-Gleichung glauben machen will. Dieser scheinbare Widerspruch führt uns zum Kern eines hartnäckigen Quanten-Rätsels.

Die so genannte Kopenhagener Deutung, die aus Diskussionen zwischen Bohr und Heisenberg gegen Ende der zwanziger Jahre hervorging, versucht das Rätsel zu lösen, indem sie behauptet, Beobachtungen oder Messungen seien etwas ganz und gar Spezielles (siehe Kasten oben). Solange die labile Karte unbeobachtet bleibt, entwickelt sich ihre Wellenfunktion gemäß der Schrödinger-Gleichung; diese kontinuierliche und glatte Entwicklung heißt in der Mathematik „unitär“ und hat mehrere höchst attraktive Eigenschaften. Die unitäre Entwicklung erzeugt die Superposition, bei der die Karte sowohl nach links als auch nach rechts umgefallen ist. Doch der Akt der Beobachtung löst bei der Wellenfunktion der Karte eine abrupte Veränderung aus, die meist „Kollaps“ genannt wird: Der Beobachter sieht die Karte in einem definierten klassischen Zustand – Bildseite entweder oben oder unten –, und von da an besteht nur noch dieser Teil der Wellenfunktion weiter. Demnach wählt die Natur einen Zustand nach dem Zufallsprinzip aus, wobei die Wahrscheinlichkeiten durch die Wellenfunktion festgelegt werden.

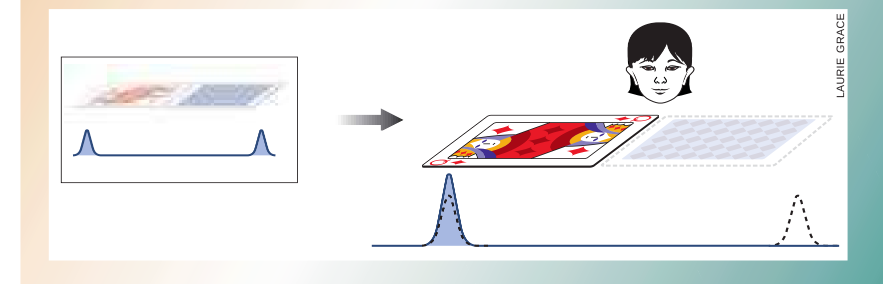
Die Kopenhagener Deutung lieferte ein enorm erfolgreiches Rechenrezept, das die experimentellen Resultate richtig wiedergab – aber der Verdacht blieb, dass irgendeine Gleichung angeben sollte, wann und wie dieser Kollaps eintritt. Viele Physiker sahen im Fehlen dieser Gleichung ein Indiz, dass etwas Wichtiges mit der Quantenmechanik nicht stimme und dass sie bald durch eine fundamentalere Theorie ersetzt würde, die eine solche Gleichung liefern könne. Doch statt sich mit ontologischen Spekulationen über diese oder jene Gleichung aufzuhalten, entwickelten die meisten Physiker die vielfältigen aufregenden Anwendungen der Theorie zügig weiter und machten ▶

Die ursprüngliche Interpretation

Die Kopenhagener Deutung

Grundidee: Beobachter sehen ein Zufallsergebnis; die Wellenfunktion gibt die bei der Beobachtung auftretende Wahrscheinlichkeit an.
Vorteil: Ein einziges Ergebnis tritt ein, das dem entspricht, was wir beobachten.
Problem: Diese Deutung erfordert den „Kollaps“ der Wellenfunktion, doch es gibt keine Gleichung, die angibt, wann er eintritt.

Wenn eine Quantensuperposition beobachtet oder gemessen wird, sehen wir zufällig die eine oder die andere Alternative, wobei die Wahrscheinlichkeiten durch die Wellenfunktion gegeben sind. Ein Beobachter, der zuvor darauf gewettet hat, dass die Karte mit dem Bild nach oben liegen wird, stellt beim ersten Blick auf die Karte mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit zufrieden fest, dass er die Wette gewonnen hat. Diese Interpretation wurde aus pragmatischen Gründen lange akzeptiert, obwohl sie eine abrupte Veränderung der Wellenfunktion – den so genannten Kollaps – unter Verletzung der Schrödinger-Gleichung voraussetzt.



sich an die drängenden ungelösten Probleme der Kernphysik.

Diese pragmatische Einstellung erwies sich als ungeheuer erfolgreich. Die Quantenmechanik war unabdingbar, um die Existenz von Antimaterie vorherzusagen, die Radioaktivität zu verstehen – und die Kernenergie zu nutzen –, das Verhalten von Halbleitern und die Supraleitung zu erklären, die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie zu beschreiben – was zur Erfindung des Lasers führte – sowie diejenige zwischen Radiowellen und Atomkernen, woraus die Kernspintomographie hervorging. Viele Erfolge der Quantenmechanik sind ihrer Erweiterung, der Quantenfeldtheorie, zu verdanken: Sie bildet die Grundlage der Elementarteilchenphysik bis hin zu den neuesten Experimenten zu Neutrino-Oszillationen, zur aktuellen Suche nach dem Higgs-Teilchen und zur Supersymmetrie.

Gastkommentar

Ist das Problem des quantenmechanischen Messprozesses nun endlich gelöst?

Diese Frage kann man ganz sicher nicht einfach mit „ja“ beantworten. Die Ansicht von Niels Bohr, der Quantenmessprozess sei grundsätzlich nicht physikalisch analysierbar, darf aber heute wohl als widerlegt gelten.

Dekohärenz ist eine zwingende Konsequenz der Schrödinger-Gleichung unter realistischer Berücksichtigung der natürlichen Umgebung eines Systems – unabhängig von allen Interpretationsfragen. Sie beruht auf einer sehr effizienten „Verschränkung“ praktisch aller physikalischen Systeme, die lange Zeit einfach übersehen worden ist. Der Dekohärenzprozess ist inzwischen auch experimentell – zuerst durch Serge Haroche (Paris) – direkt nachgewiesen worden. Zur theoretischen Untersuchung dieses Quantenphänomens haben neben Wojciech Zurek (Los Alamos) vor allem Erich Joos (früher Heidelberg) und Claus Kiefer (Freiburg) beigetragen. Max Tegmark, Koautor des vorliegenden Artikels, ist vornehmlich durch seine Anwendung der Dekohärenz auf Gehirnprozesse bekannt geworden; damit hat er den spekulativen Vorschlägen von Roger Penrose und Stuart Hameroff, wonach menschliches Denken auf kohärenten Quantenprozessen beruhe oder gar einen durch Gravitation induzierten „Kollaps der Wellenfunktion“ einschließe, den Boden entzogen. Tegmarks Arbeit beschreibt somit das „letzte Stück“ des von Einstein im Gespräch mit Heisenberg geforderten „ganzen langen Wegs vom Vorgang bis zur Fixierung in unserem Bewußtsein“ in rein quantenmechanischen Begriffen.

Diese Erfolge erlauben es nach meiner Überzeugung, nunmehr auf unabhängig vorzugebende klassische Begriffe und auf Verlegenheitsvokabeln wie Komplementarität, Dualismus oder Quantenlogik ganz zu verzichten. All die „erstaunlichen“ Experimente der letzten Jahrzehnte haben nur Konsequenzen der nichtlokalen Wellenfunktion bestätigt, wobei alle Messergebnisse durch Dekohärenz klassisch fixiert werden. Scheinbare „Quantensprünge“ sind demnach ebenso das Ergebnis von sehr schnellen, aber stetigen Dekohärenzvorgängen wie die Lokalisierung von Quantenobjekten als scheinbare „Teilchen“ – sei es als Spuren in der Nebelkammer oder als Klicks in Zählern.

Andererseits dürfte die von Everett gezogene Konsequenz von „Mehrfachwelten“ von den meisten Physikern weiterhin abgelehnt werden – vorwiegend aus emotionalen Gründen. Diese pragmatische Haltung ist aber auch im Rahmen einer universell gültigen Schrödinger-Gleichung durchaus möglich, wenn man den Begriff der Realität „operationell“ versteht: Als real gilt jeweils nur das, was für die in jedem „Everett-Zweig“ separat existierenden Beobachter noch beobachtbar ist. Die Everettsche Quantenwelt definiert hingegen eine „hypothetische Realität“, die der quantenphysikalischen Konsistenz zuliebe verlangt werden muss. Demzufolge kann man nicht erwarten, jemals einen Kollaps der Wellenfunktion zu beobachten, der nicht als rein quantenmechanischer Dekohärenzprozess erklärbar wäre. Der Kollaps auf ein bestimmtes Ergebnis beschreibt dagegen die sich stetig verändernde Situation der Beobachter in der Quantenwelt.

Der „große Nebel aus dem Norden“, wie man die Kopenhagener Deutung gelegentlich genannt hat, beginnt sich zu lichten. Die sichtbar werdende Landschaft zeigt eine unsere gewohnte Vorstellungswelt weit übersteigende Vielfalt, ergibt dafür aber erstmals ein konsistentes Bild.



H. Dieter Zeh ist emeritierter Professor der Theoretischen Physik an der Universität Heidelberg.

Viele Welten

Bis in die fünfziger Jahre hatte die fortdauernde Erfolgsserie klar erwiesen, dass die Quantentheorie viel mehr war als eine kurzlebige Hilfskonstruktion. Darum beschloss ein Student namens Hugh Everett III an der Universität Princeton Mitte der fünfziger Jahre, in seiner Dissertation das Kollaps-Postulat erneut unter die Lupe zu nehmen. Everett trieb den Geltungsbereich des Quantenformalismus auf die Spitze, indem er fragte: Was, wenn die zeitliche Entwicklung des gesamten Universums stets unitär ist? Wenn die Quantenmechanik das Universum zu beschreiben vermag, dann wird sein gegenwärtiger Zustand durch eine – äußerst komplizierte – Wellenfunktion beschrieben. Everett zufolge entwickelt sich diese Wellenfunktion stets auf deterministische Weise und lässt keinen Raum für einen mysteriösen nicht-unitären Kollaps oder einen würfelnden Gott.

Statt durch Messungen zu kollabieren, werden demnach mikroskopische Superpositionen blitzartig zu monströsen makroskopischen Überlagerungen vergrößert. Unsere Quanten-Spielkarte aus dem Gedankenexperiment ist wirklich an zwei Orten gleichzeitig. Ein Beobachter der Karte gerät in eine Superposition aus zwei unterschiedlichen mentalen Zuständen, wobei jeder eine der beiden Möglichkeiten wahrnimmt. Hätten Sie darauf gewettet, dass die Spielkarte mit dem Bild nach oben landet, so würden Sie als Überlagerung von lächelnd und schmollend enden. Everetts brillante Erkenntnis war, dass die Beobachter in einer solchen deterministischen und zugleich schizophrenen Quantenwelt dennoch die gute alte Realität wahrnehmen können, mit der wir vertraut sind. Vor allem konstatieren sie ein Zufallsverhalten, das den korrekten Wahrscheinlichkeitsregeln gehorcht (siehe Kasten Seite 75).

Everetts Standpunkt hieß zwar ursprünglich Relativzustandsformulierung, wurde aber als Vielwelten-Interpretation der Quantenmechanik bekannt, weil jede Komponente der Beobachter-Superposition ihre eigene Welt wahrnimmt. Dieser Standpunkt vereinfacht die Theorie, in-

Eine Alternative zur Kopenhagener Deutung

Dekohärenz: Wie die Quanten klassisch werden

Grundidee: Winzige Wechselwirkungen mit der Umgebung zerstören blitzschnell die Quantennatur der Superpositionen.
Vorteile: Experimentell nachprüfbar. Erklärt, warum die Alltagswelt sich „klassisch" verhält und nicht quantentheoretisch.
Einschränkung: Die Dekohärenz kommt nicht ganz ohne (Vielwelten- oder Kopenhagener) Interpretation aus.

Die Unbestimmtheit einer Quantensuperposition (links) unterscheidet sich von der Unbestimmtheit der klassischen Wahrscheinlichkeit bei einem Münzwurf (rechts). Ein mathematisches Objekt namens Dichtematrix verdeutlicht den Unterschied. Die Wellenfunktion der Quantenkarte entspricht einer Dichtematrix mit vier Maxima. Zwei davon bezeichnen die 50-prozentige Wahrscheinlichkeit jedes Ergebnisses, Kopf oder Zahl. Die anderen beiden zeigen an, dass diese beiden Ergebnisse im Prinzip immer noch miteinander interferieren können. Der Quantenzustand ist noch immer „kohärent". Die Dichtematrix eines Münzwurfs hat nur die ersten beiden Maxima; das bedeutet einfach, dass die Münze wirklich entweder Kopf oder Zahl zeigt, aber dass wir nur noch nicht nachgesehen haben.

quantenphysikalische Unbestimmtheit

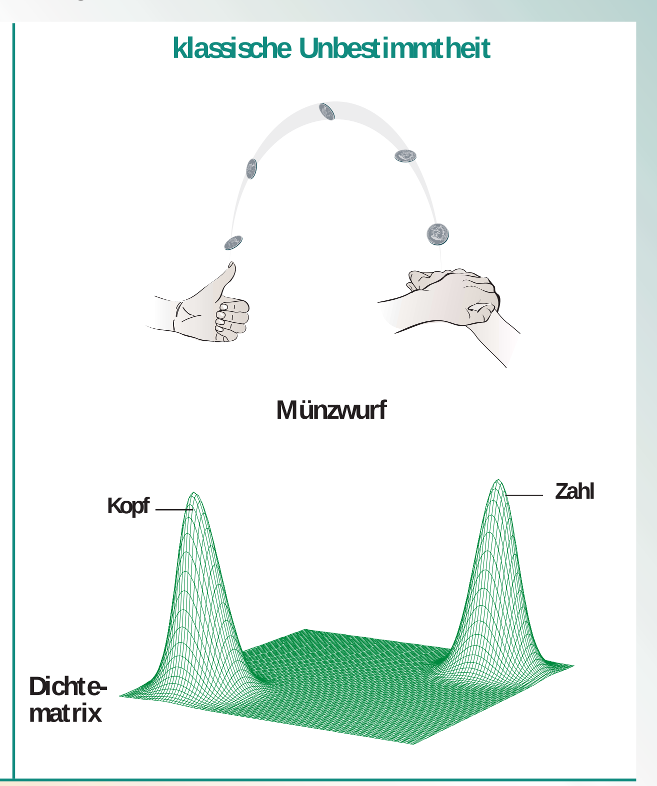
kohärente Superposition

Interferenz

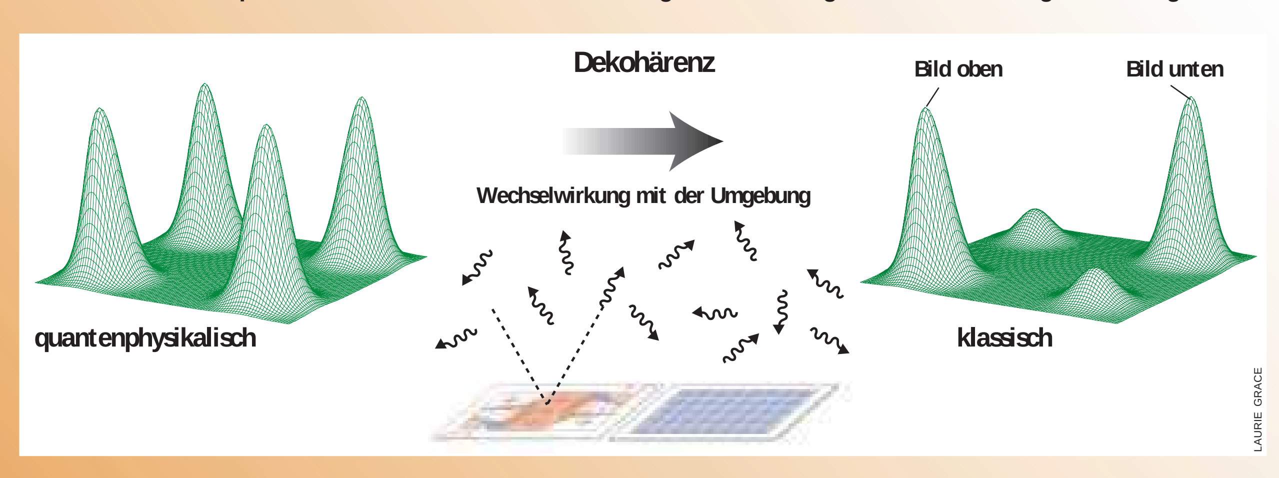
Bild oben

Bild unten

Dichte-
matrix



Der Dekohärenz-Theorie zufolge verändert schon die kleinste Wechselwirkung mit der Umgebung – etwa ein einzelnes von der Karte abprallendes Photon oder Luftmolekül – eine kohärente Dichtematrix derart, dass sie klassische Wahrscheinlichkeiten wiedergibt wie bei einem Würfelwurf. Der gesamte Prozess gehorcht der Schrödinger-Gleichung.



dem er das Kollaps-Postulat aus der Welt schafft. Doch der Preis für diese Vereinfachung ist die Konsequenz, dass die parallelen Wahrnehmungen der Wirklichkeit alle gleichermaßen real sind.

Everetts Arbeit wurde zwei Jahrzehnte lang praktisch ignoriert. Viele Physiker hofften noch immer auf eine tiefer liegende Theorie, aus der vielleicht hervorginge, dass die Welt in gewissem Sinne doch klassisch sei – jedenfalls frei von Kuriositäten wie großen Objekten an zwei Orten zugleich. Doch solche Hoffnungen wurden durch eine Serie neuer Experimente zunichte gemacht.

Lässt sich die quantenphysikalische Zufälligkeit vielleicht durch irgendwelche unbekannten Größen innerhalb der Teilchen – so genannte verborgene Variable – klassisch erklären, das heißt auf deterministische Prozesse zurückführen? Wie der damals am europäischen Kernforschungszentrum Cern tätige Theoretiker John S. Bell zeigte, würden in diesem Fall gewisse Ensembles von Messwerten, die in höchst diffizilen Experimenten bestimmt werden könnten, unweigerlich den Vorhersagen der etablierten Quantentheorie widersprechen. Erst nach vielen Jahren wurden solche Versuche technisch durchführbar; sie schlossen die Existenz von (lokalen) verborgenen Variablen definitiv aus.

Einer von uns (Wheeler) schlug schon 1978 ein „Experiment mit verzögerter Wahl" vor, das schließlich 1984 ausgeführt wurde. Es demonstriert eine weitere Quanteneigenschaft, die jeder klassischen Beschreibung Hohn spricht: Nicht nur, dass ein Photon an zwei Orten zugleich sein kann – die Experimentatoren können sogar im Nachhinein auswählen, ob das Photon sich an beiden Orten aufgehalten hat oder nur an einem der beiden.

Auch das einfache Doppelspalt-Experiment, bei dem Photonen oder Elektronen nach Passieren zweier Spalte ein Interferenzmuster erzeugen – nach Richard Feynman der typische Quanteneffekt überhaupt –, wurde im Laufe der Zeit mit immer größeren Objekten wiederholt: mit Atomen, kleinen Molekülen und kürzlich sogar mit Kügelchen aus 60 Kohlenstoffatomen, so genannten Fullerenen. Nach diesem letzten Kunststück hält Anton Zeilinger von der Universität Wien es sogar für möglich, das Experiment mit Viren durchzuführen. Kurz, alle Experimente besagen eindeutig: Die Quantenwelt ist wirklich so seltsam, ob es uns passt oder nicht.

Nicht nur die Experimentiertechnik machte in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte, sondern auch die Theorie. Everetts Arbeit ließ entscheidende Fragen unbeantwortet: Wenn die Welt tatsächlich bizarre makroskopische Superpositionen enthält, warum nehmen wir sie nicht wahr?

Eine bahnbrechende Arbeit von H. Dieter Zeh von der Universität Heidelberg lieferte 1970 die Antwort. Er zeigte, dass die Schrödinger-Gleichung selbst eine Art Zensur zur Folge hat. Dieser Effekt wurde unter dem Namen Dekohärenz bekannt, denn eine ursprünglich vollkommene Superposition heißt kohärent. In den folgenden Jahrzehnten wurde das Prinzip der Dekohärenz durch Wojciech H. Zurek vom Los Alamos National Laboratory in New Mexico sowie von Zeh und anderen detailliert ausgearbeitet. Demnach bestehen kohärente Superpositionen nur, solange der Rest der Welt sozusagen nichts von ihnen weiß. Die umgefallene Quantenkarte aus unserem Gedankenexperiment wird fortwährend von neugierigen Luftmolekülen und Photonen angestoßen, die infolgedessen herausfinden, ob sie nach rechts oder nach links umgeklappt ist; durch Zerstören der Superposition – durch „Dekohärenz" – wird die Zustandsüberlagerung als solche unbeobachtbar (siehe Kasten auf Seite 73). Es ist fast, als übernehme die Umgebung die Rolle des Beobachters, der den Kollaps der Wellenfunktion herbeiführt. Angenommen, Ihre Freundin betrachtet die liegende Spielkarte, ohne Ihnen das Ergebnis zu verraten. Gemäß der Kopenhagener Deutung lässt dieser Messvorgang die Superposition zu einem eindeutigen Resultat kollabieren, und Ihre bestmögliche Beschreibung der Karte verwandelt sich aus einer Quantensuperposition in eine klassische Darstellung Ihrer Unkenntnis dessen, was Ihre Freundin gesehen hat. Grob gesagt zeigen die Dekohärenz-Berechnungen, dass man auch ohne menschlichen Beobachter – oder expliziten Kollaps der Wellenfunktion – praktisch denselben Effekt erhält: Schon ein von der liegenden Karte abprallendes Luftmolekül genügt. Diese winzige Wechselwirkung verwandelt die Superposition lokal augenblicklich in eine klassische Situation – zumindest unter allen praktischen Gesichtspunkten.

Quantenzensur und Dekohärenz

Die Dekohärenz erklärt, warum wir im Alltag keine Quantensuperpositionen sehen. Der Grund ist nicht etwa, dass die Quantenmechanik an sich für Objekte oberhalb einer magischen Größe nicht gelten würde. Vielmehr ist es fast unmöglich, makroskopische Gegenstände wie Katzen und Spielkarten auf Dauer so perfekt zu isolieren, wie es erforderlich wäre, um Dekohärenz zu verhindern. Hingegen lassen sich mikroskopische Objekte einfacher von ihrer Umgebung isolieren und behalten darum ihr Quantenverhalten bei.

Eine weitere Frage, die in Everetts Arbeit unbeantwortet blieb, war subtiler, aber ebenso wichtig: Was für ein Mechanismus wählt just die klassischen Zustände – bei unserer Karte entweder „Bild oben" oder „Bild unten" – als besondere aus? Als abstrakte Quantenzustände betrachtet ist an ihnen nichts Besonderes gegenüber den unzähligen möglichen Überlagerungen von „Bild oben" und „Bild unten" mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen. Warum spalten die vielen Welten sich fein säuberlich gemäß der uns vertrauten Alternative Oben/Unten auf – und niemals längs anderer Alternativen?

Auch diese Frage vermag die Dekohärenz zu beantworten. Den Berechnungen zufolge sind klassische Zustände wie „Bild oben" und „Bild unten" genau diejenigen, denen Dekohärenz nichts anhaben kann. Das heißt also, Wechselwirkun-

Literaturhinweise

The Quantum Centennial. Von A. Zeilinger in: Nature, Bd. 408, S. 639 (Dezember 2000).

Max Planck: The Reluctant Revolutionary. Von Helge Kragh in: Physics World, Bd. 13, S. 31 (Dezember 2000)

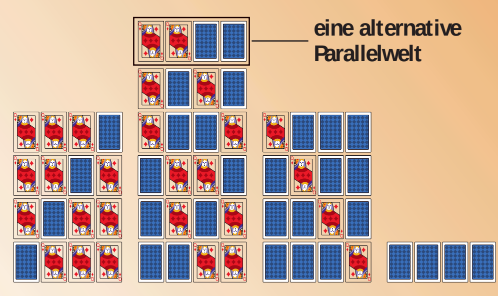
One Hundred Years of Quantum Physics. Von Daniel Kleppner und Roman Jackiw in: Science, Bd. 289, S. 893 (August 2000).

*Weblinks unter **www.wissenschaft-online.de/spektrum/***

***Max Tegmark** und **John Archibald Wheeler** führten ausgiebige Debatten zur Quantentheorie während der dreieinhalb Jahre, die Tegmark als Postdoc am Institute for Advanced Studies in Princeton (New Jersey) weilte. Tegmark ist jetzt Assistenz-Professor für Physik an der Universität von Pennsylvania. Wheeler ist emeritierter Physik-Professor in Princeton, wo unter anderem Richard Feynman und Hugh Everett III seine Schüler waren. 1934/35 arbeitete Wheeler mit Niels Bohr in Kopenhagen zusammen über Kernphysik.*
Die Autoren danken Jeff Klein, H. Dieter Zeh und Wojciech H. Zurek für hilfreiche Hinweise.

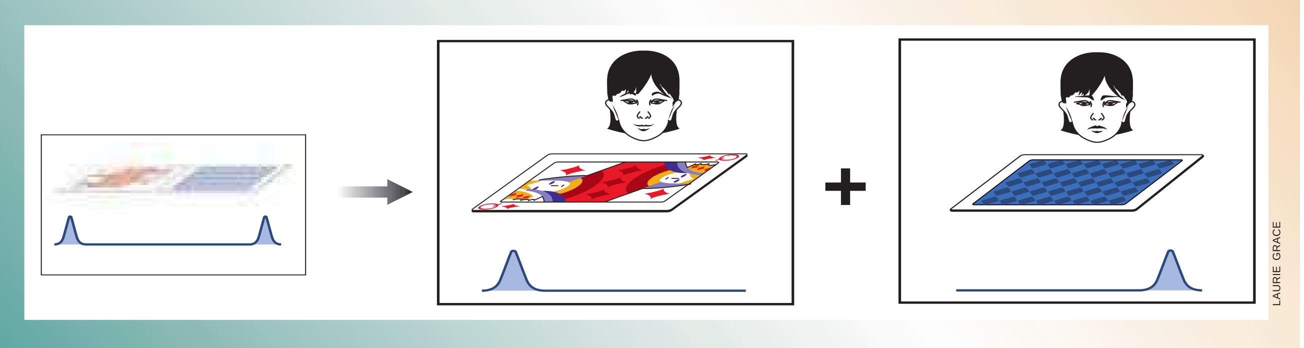
Everetts parallele Welten

Die Vielwelten-Interpretation



Grundidee: Superpositionen beschreiben alternative Parallelwelten.
Vorteil: Die Schrödinger-Gleichung gilt uneingeschränkt; Wellenfunktionen kollabieren nie.
Problem: Die Idee mutet bizarr an. Gewisse technische Probleme bleiben bestehen.

Wenn Wellenfunktionen niemals kollabieren, sagt die Schrödinger-Gleichung voraus, dass der Beobachter der Karten-Superposition sich selbst in eine Superposition von zwei möglichen Zuständen verwandelt: zufriedener Gewinner oder enttäuschter Verlierer der Wette. Diese beiden Teile der Gesamtwellenfunktion – von Beobachter plus Karte – entwickeln sich völlig unabhängig voneinander weiter, wie zwei parallele Welten. Wenn das Experiment viele Male wiederholt wird, werden die Beobachter in den meisten Parallelwelten die Karte in rund 50 Prozent der Fälle mit dem Bild nach oben liegen sehen. Die Kartenpyramide (oben) zeigt 16 Welten, die dadurch entstehen, dass das Aufstellen und Umfallen der Karte vier Mal wiederholt wird.



LAURIE GRACE

gen mit der Umwelt lassen zwar Karten mit dem Bild oben und Karten mit dem Bild unten unbehelligt, zwingen aber jede Superposition von „oben“ und „unten“ in eine der klassischen Alternativen „oben“ oder „unten“.

Üblicherweise analysieren die Physiker das Universum, indem sie es in zwei Bereiche aufspalten. Zum Beispiel trennen die Theoretiker in der Thermodynamik einen materiellen Körper von allem Übrigen rundum, und diese „Umgebung“ definiert dann die herrschenden Temperatur- und Druckbedingungen. Die Quantenphysik trennt für gewöhnlich das Quantensystem von der klassischen Messvorrichtung. Wenn man Unitarität und Dekohärenz ernst nimmt, ist es lehrreich, das Universum in drei Bereiche zu unterteilen: das jeweilige Objekt, die Umgebung und das beobachtende Subjekt (siehe Kasten auf Seite 76).

Die durch Wechselwirkung der Umwelt mit dem Objekt oder dem Subjekt verursachte Dekohärenz garantiert, dass wir niemals Quantensuperpositionen von mentalen Zuständen wahrnehmen. Außerdem ist unser Gehirn unentwirrbar mit der Umwelt verwoben; darum tritt, wenn unsere Neuronen feuern, unvermeidlich und praktisch augenblicklich Dekohärenz ein. Wie Zeh betont hat, rechtfertigen diese Schlussfolgerungen die seit langem geübte Praxis, das Lehrbuch-Postulat vom Kollaps der Wellenfunktion als pragmatisches Rezept – nach der Devise „Halt den Mund und rechne“ – zu benutzen: Berechne Wahrscheinlichkeiten so, als würde die Wellenfunktion kollabieren, wenn das Objekt beobachtet wird. Obgleich von Everetts Standpunkt die Wellenfunktion streng genommen niemals kollabiert, stimmen die Dekohärenz-Forscher im Allgemeinen darin überein, dass die Dekohärenz eine Wirkung hat, die einem Kollaps zum Verwechseln ähnlich sieht.

Dekohärenz und Gehirn

Durch die Entdeckung der Dekohärenz sowie durch immer raffiniertere experimentelle Demonstrationen kurioser Quanteneigenschaften haben die Ansichten der Physiker sich merklich gewandelt. Der Begriff „Kollaps der Wellenfunktion“ sollte einst hauptsächlich erklären, warum bei Experimenten spezifische Ergebnisse herauskommen und nicht seltsame Überlagerungen von Ergebnissen. Nun hat sich dieses Motiv praktisch erledigt. Außerdem vermochte peinlicherweise niemand eine nachprüfbare Gleichung vorzulegen, die präzise festlegt, wann und wo der mysteriöse Kollaps eintreten soll.

Eine informelle Umfrage, die im Juli 1999 bei einer Tagung über Quantencomputer am Isaac-Newton-Institut in Cambridge durchgeführt wurde, deutet auf einen allmählichen Meinungsumschwung hin. Von neunzig befragten Physikern bekannten sich nur acht ausdrücklich zum Kollaps der Wellenfunktion. Dreißig wählten „Viele Welten oder konsistente Historien (ohne Kollaps)“. Der „Ansatz mit konsistenten Historien“ (consistent-histories approach) analysiert, grob gesagt, Serien von Messungen und lässt von den durch die Messresultate definierten „Historien“ nur solche zu, für die sich als Ganzes „konsistente“ Wahrscheinlichkeiten ergeben.

Aber das Meinungsbild ist undeutlich: Von den Befragten wollten sich die meisten, nämlich fünfzig Forscher, für keine der angebotenen Antworten entscheiden. Ein Grund für diese große Anzahl mag der grassierende terminologische Wirrwarr sein. Nicht selten sagen zwei Physiker beispielsweise, sie seien für die Kopenhagener Deutung, und stellen dann fest, dass sie nicht dasselbe darunter verstehen.

Trotzdem macht die Umfrage deutlich, dass es an der Zeit ist, die Lehrbücher der Quantenmechanik zu aktualisieren. Obzwar diese Bücher in einem der ersten Kapitel unweigerlich den nichtunitären Kollaps als fundamentales Postulat anführen, zeigt die Umfrage, dass heute viele Physiker – zumindest auf dem ▶

brandneuen Gebiet der Quantencomputer – dieses Postulat nicht mehr ernst nehmen. Der Begriff Kollaps wird zweifellos seinen Nutzen als Rechenrezept behalten, aber ein warnender Kommentar, der verdeutlicht, dass es sich dabei wahrscheinlich nicht um einen fundamentalen Vorgang handelt, der die Schrödinger-Gleichung verletzt, könnte klugen Studenten stundenlanges Grübeln ersparen.

Umrisse einer endgültigen Theorie

Nach hundert Jahren Quantentheorie – was liegt vor uns? Welche Rätsel bleiben? Warum gibt es Quanten? Obwohl in den Debatten um die richtige Interpretation der Quantenmechanik oft Grundfragen der Ontologie und des tiefsten Wesens der Realität auftauchen, ist diese Theorie wohl nur ein Stein in einem größeren Puzzle. Theorien lassen sich grob in einem hierarchischen Schema anordnen, wobei sich jede – zumindest im Prinzip – von fundamentaleren Theorien herleitet, die in der Hierarchie über ihr stehen. Fast ganz oben thronen Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie. Die Schicht darunter umfasst Spezielle Relativitätstheorie und Quantenmechanik, die ihrerseits Elektromagnetismus, klassische Mechanik, Atomphysik und so fort unter sich haben. Fachgebiete wie Informatik, Psychologie und Medizin erscheinen in diesem Schema tief unten.

All diese Theorien enthalten zwei Komponenten: mathematische Gleichungen sowie Worte, die erklären, wie die Gleichungen mit experimentellen Beobachtungen zusammenhängen. Die Quantenmechanik hat in der üblichen Lehrbuchdarstellung beide Komponenten: einige Gleichungen sowie drei grundlegende Postulate, die in gewöhnlicher Umgangssprache formuliert sind. Auf jeder Stufe der Theorie-Hierarchie werden neue Begriffe – wie Proton, Atom, Zelle, Organismus, Kultur – eingeführt, weil sie auf bequeme Weise das Wesentliche einfangen, ohne auf die übergeordneten Theorien zurückgreifen zu müssen. Im Großen und Ganzen nimmt das Verhältnis von Gleichungen zu Worten ab, wenn man in der Hierarchie abwärts schreitet, und fällt für sehr anwendungsnahe Gebiete wie Medizin und Soziologie fast auf null. Hingegen sind die Theorien in der Nähe des Gipfels fast reine Mathematik, und die Physiker kämpfen noch immer darum, die mathematisch verschlüsselten Begriffe zu verstehen.

Das Endziel der Physik ist etwas, das halb im Scherz eine Theorie von Allem genannt wird – eine Theorie, aus der sich alles Übrige herleiten lässt. Falls eine solche Theorie existiert, würde sie die Spitze der Hierarchie einnehmen, und sowohl die Allgemeine Relativitätstheorie als auch die Quantenfeldtheorie könnten von ihr abgeleitet werden. Die Physiker wissen, dass an der Spitze etwas fehlt, denn das Universum enthält sowohl Gravitation als auch Quantenmechanik, aber eine konsistente Theorie, die beides umfasst, steht noch aus.

Eine allumfassende Theorie müsste vermutlich gar keine Begriffe enthalten. Andernfalls würde man sehr wahrscheinlich eine Erklärung für ihre Begriffe in Form einer noch fundamentaleren Theorie suchen – und so immer weiter in unendlichem Regress. Mit anderen Worten, die Theorie müsste rein mathematisch sein, ohne erklärende Postulate. Vielmehr sollte ein unendlich intelligenter Mathematiker fähig sein, die gesamte Hierarchie der Theorien allein aus diesen ultimativen Gleichungen herzuleiten, indem er die von ihnen beschriebenen Eigenschaften des Universums herleitet – und die Eigenschaften seiner Bewohner und ihre Wahrnehmungen der Welt.

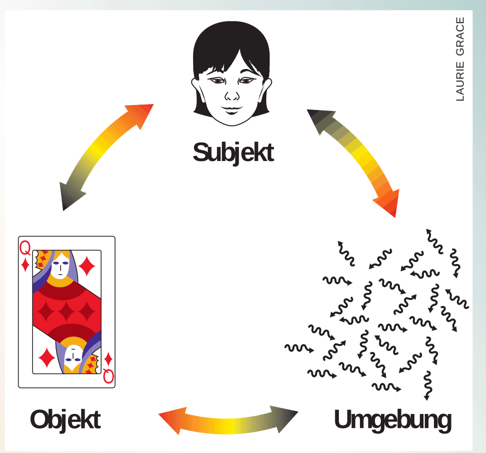
Die ersten hundert Jahre Quantenphysik haben folgenreiche Technologien geliefert und viele Fragen beantwortet. Doch die Physik hat neue Fragen aufgeworfen, die ebenso wichtig sind wie jene zur Zeit von Maxwells Antrittsvorlesung – Fragen, die sowohl die Quantengravitation betreffen als auch das tiefste Wesen der Realität. Gewiss wird das zweite Jahrhundert Quantenphysik nicht weniger Überraschungen bringen als das erste. ■

Wie das Gehirn Dekohärenz erzeugt

Quantentheorie und Bewusstsein

Um die Rolle des Beobachters in der Quantentheorie zu untersuchen, ist es sinnvoll, das Universum in drei Teile aufzuspalten: das betrachtete Objekt, die Umgebung und den Quantenzustand des Beobachters oder Subjekts. Die Schrödinger-Gleichung, der das Universum als Ganzes gehorcht, lässt sich unterteilen in Ausdrücke, die die innere Dynamik jedes dieser drei Untersysteme beschreiben, und Ausdrücke, die Wechselwirkungen zwischen ihnen beschreiben. Diese Ausdrücke haben höchst unterschiedliche Wirkungen.

Der Ausdruck für die Dynamik des Objekts ist normalerweise der wichtigste; darum können die Theoretiker, wenn sie zunächst das Verhalten des Objekts untersuchen wollen, meist alle übrigen Ausdrücke vernachlässigen. Im Falle unserer Quantenkarte sagt ihre Dynamik voraus, dass sie eine Superposition bilden und sowohl nach links als auch nach rechts fallen wird. Wenn unser Beobachter die Karte betrachtet, erstreckt sich die Superposition durch die Wechselwirkung zwischen Subjekt und Objekt auch auf seinen mentalen Zustand und erzeugt eine Superposition von Freude und Enttäuschung über Gewinn und Verlust seiner Wette. Doch er vermag diese Superposition niemals wahrzunehmen, denn die Wechselwirkung zwischen Objekt und Umgebung – etwa durch von der Karte abprallende Luftmoleküle und Photonen – verursacht sofortige Dekohärenz dieser Superposition. Selbst wenn der Betrachter die Karte völlig von der Umgebung isolieren könnte – indem er das Experiment etwa in eine dunkle Vakuumkammer am absoluten Temperaturnullpunkt verlegte –, würde das keinen Unterschied machen. Beim ersten Blick auf die Karte würde zumindest ein Neuron in seinem Sehnerv eine Superposition von „feuern“ und „nicht feuern“ bilden, und diese Superposition müsste – wie einer der Autoren (Tegmark) kürzlich berechnet hat – binnen rund 10^{-20} Sekunden durch Dekohärenz zerfallen. Wenn die komplexen Muster der feuernden Neuronen im Gehirn auch nur das Geringste mit Bewusstsein zu tun haben und damit, wie wir Gedanken und Wahrnehmungen bilden, dann garantiert die Dekohärenz unserer Neuronen, dass wir niemals Quantensuperpositionen mentaler Zustände wahrnehmen. Im Wesentlichen verknüpft unser Gehirn das Subjekt unentwirrbar mit der Umgebung und zwingt uns dadurch die Dekohärenz auf.





Die Schwebebahn von Elberfeld nach Barmen

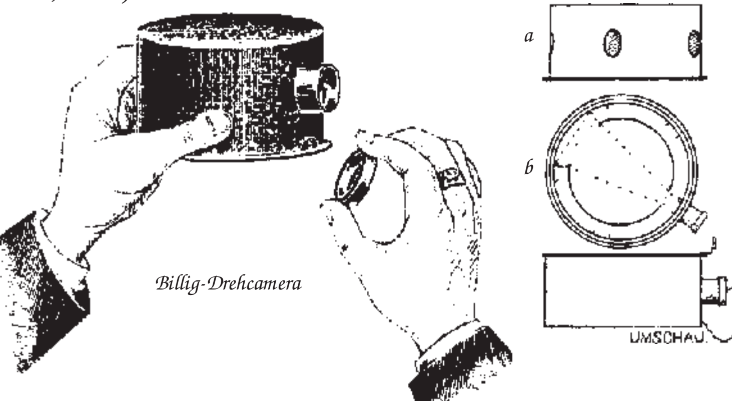
Am 1. März l. J. wurde die erste Schwebebahn der Welt dem öffentlichen Verkehre übergeben. ... Die dem Verkehre übergebene Strecke hat eine Gesammtlänge von 4,5 km; sie wird fahrplanmässig (inclusive Aufenthalt) in 13 Minuten, also mit 21 km pro Stunde Geschwindigkeit, durchfahren. ... Der Zudrang zu den Bahnhöfen nahm schon in den ersten Stunden sehr stark zu. ... Die Betriebsleitung befürchtete, dass die Zahl der Zudrängenden sich nach Schluss der Geschäftsstunden plötzlich noch erheblich vermehren würde und so leicht ein Unglücksfall bei dem für solche enorme Frequenz noch nicht erprobten Betriebe verursachen könnte, weshalb der Verkehr gegen sechs Uhr Abends eingestellt wurde. *(Oesterreichische Eisenbahn-Zeitung, Nr. 11, 24. Jg., 10. April 1901, S. 117)*

Rotierende Billig-Camera für Schnappschüsse

Die Camera ist eine einfache runde Kartonschachtel, an deren innerer Seitenwand man fünf Platten im Format 7 x 11 cm zwischen Blechleisten einschieben kann. Zwischen je zwei Blechleisten und gegenüber je einer Platte ist ein Loch, vor das das Objektiv kommt (*a*). Auf diese Schachtel wird nun der Deckel gestülpt, der an seiner äussern, übergreifenden Wand das Objektiv trägt, während eine innere Wand so durchbrochen ist, dass die Lichtstrahlen vom Objektiv zur gegenüberliegenden Platte gelangen können, die anderen Platten hingegen vor diesem Licht geschützt sind (*b*). ... Durch Drehung des Deckels kann man somit eine Platte nach der andern vor das Objektiv bringen. *(Die Umschau, V. Jg., Nr. 17, 20. April 1901, S. 337)*

Glühfäden aus Osmium

Die bei der Auer-Welsbach-Glühlampe benutzten Osmiumfäden werden in der Form dünner Röhren hergestellt, was dadurch ermöglicht ist, daß dieses Metall schon bei verhältnismäßig niedriger Temperatur mit dem Sauerstoff der Luft eine dampfartige Verbindung eingeht, welche einen feinen Niederschlag auf Platindraht bildet. Hierauf wird der so mit der Osmiumlegierung überzogene dünne Platindraht durch sehr starke Erhitzung ... verflüchtigt, so daß das Osmium in der Form eines dünnen Röhrchens zurückbleibt, das in dem wie gewöhnlich luftleer gemachten Glasgehäuse der Glühlampe an Stelle des Kohlenfadens eingesetzt wird. *(Das Neue Universum, XXII. Jg., 1901, S. 251)*



Billig-Drehcamera



Moleküle sichtbar gemacht

Erstmalig ist es E. W. Müller gelungen, Atome und Moleküle ... mit einer äußerst einfachen Anordnung, dem sogenannten Feldelektronenmikroskop, sichtbar zu machen. ... Als Objekt dient die kugelige Kalotte einer sehr feinen Wolframspitze, die als Kathode sich im Vakuum gegenüber einem ... Leuchtschirm befindet. ... Dies bedeutet bei einer angelegten Spannung von einigen 1000 V an der Kathode eine Feldstärke von 3 ... 4 x 10^7 V/cm, welche ausreicht, eine kalte Elektronenemission hervorzurufen. ... Die aus der Spitze austretenden Elektronen geben am Schirm ein Bild von der Oberfläche der Kathode ... Bei der Adsorption verschiedener Teilchen an der Kathodenoberfläche erscheinen bei angelegter Spannung auf dem Leuchtschirm die niedrig indizierten Kristallflächen des Woframs und eine Anzahl von Bildpunkten. Wie Müller zeigen konnte, sprechen sehr viele Gründe dafür, daß diese Bildpunkte als Projektionen der adsorbierten Atome oder Moleküle auf dem Leuchtschirm angesehen werden können. *(Elektrotechnische Zeitschrift, 72. Jg., Heft 8, 15. April 1951, S. 236)*

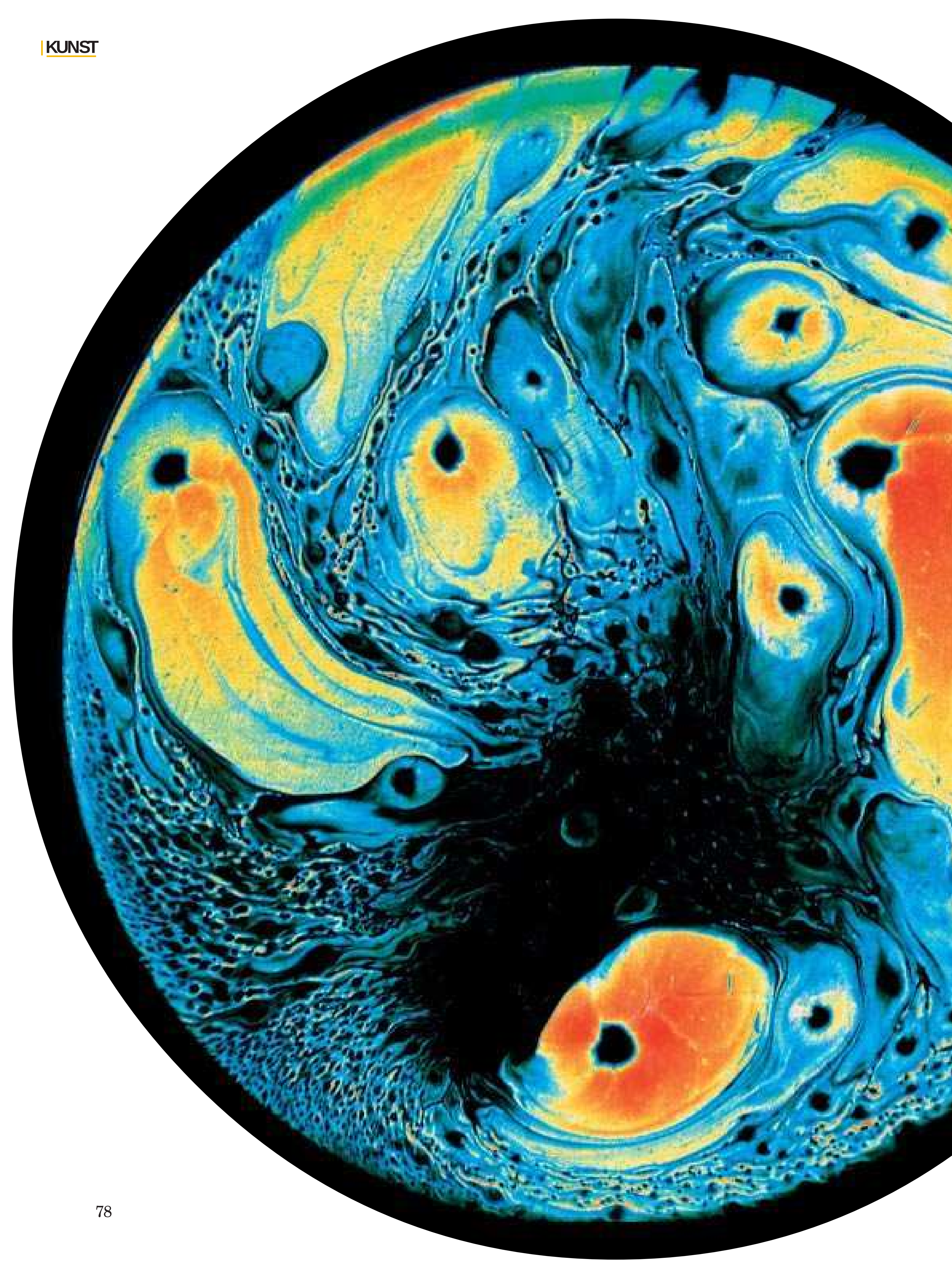

Phthalocyanid-Molekül auf einem Elektronenbild

Künstlicher Schnee

In den Vereinigten Staaten ist eine Maschine entwickelt worden, die künstlichen Schnee erzeugt ... Die der Öffentlichkeit erstmalig in den Pocono-Bergen Pennsylvaniens vorgeführte Maschine besitzt einen Kompressor mit Dieselantrieb, der Luft auf 7,35 atü komprimiert. ... Das Verfahren besteht nun grundsätzlich darin, daß das Wasser durch die ausströmende hochkomprimierte Luft mit Überschallgeschwindigkeit (etwa 1800 Kilometer in der Stunde) durch Spezialdüsen geblasen wird. Bei der sich anschließenden Ausdehnung entzieht die Luft nun dem Wasser soviel Wärme, daß es in Form feinster Schnee-Kristalle gefriert, die bis zu dreißig Meter weit fliegen. In der Luft können diese künstlichen Schnee-Kristalle noch weitere freie Wassertröpfchen binden und dadurch neue Schneeflocken bilden. *(Orion, 6. Jg., Nr. 8, 2. Aprilheft 1951, S. LXI)*

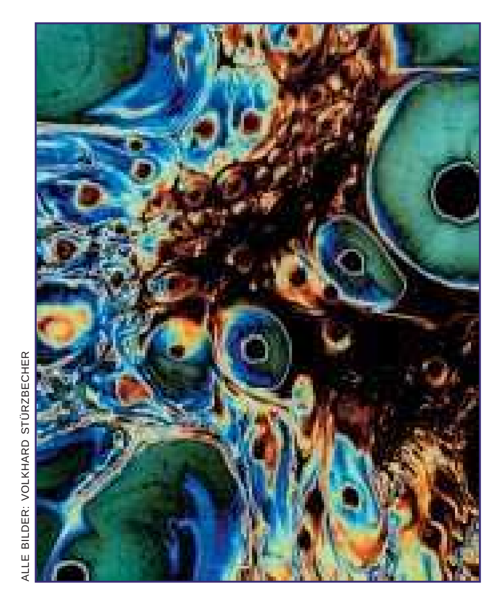
Wachstumsfördernde Antibiotica

Aureomycin, das von dem Strahlenpilz Streptomyces aureofaciens gebildet wird, ... kann als das wirksamste der klinisch angewandten Antibiotica bezeichnet werden. Neben der ausgeprägten, das Wachstum bzw. die Vermehrung von Keimen hemmenden Wirkung entdeckte man vor kurzer Zeit in den USA auch eine wachstumsfördernde. Dieser biologische Einfluß wurde nicht bei Mikroorganismen, sondern bei Säugetieren beobachtet. ... In Verbindung mit den Vitaminen B_{12} und B_{12b} zeitigte das Antibioticum bei Kücken eine beachtliche Wachstums- und Größenzunahme, wenn diese Stoffe mit dem Futter verabreicht wurden. Andere Autoren kamen zu ähnlichen Ergebnissen bei Schweinen. *(Kosmos, 47. Jg., Heft 4, April 1951, S. 190)*



BILDER, die sich selber malen

Der Künstler schwingt nicht selbst den Pinsel, sondern gestaltet das Bild durch indirekte Einflussnahme; die Ausformung im Einzelnen übernimmt ein nichtlinearer physikalischer Prozess.



ALLE BILDER: VOLKHARD STÜRZBECHER

Für diese Bilder habe ich zunächst den Boden einer Petrischale mit einer Schicht Spülmittel bedeckt und darauf an ausgewählten Stellen Farbstoff (Beize) aufgetragen. Der Farbstoff ist aus verschiedenen Pigmenten zusammengesetzt, die verschieden mit den Tensiden des Spülmittels reagieren. Für die gezeigte Formenvielfalt müssen die Komponenten sehr sorgsam aufeinander abgestimmt sein: Wasser, Alkohol und Glyzerin beeinflussen das Verhalten der Tenside; niedrige Temperaturen lassen den Prozess langsamer, fast feierlich ablaufen.



Von Volkhard Stürzbecher

Als der Chemiker Friedlieb Ferdinand Runge (1794–1867) Chemikalienlösungen auf saugfähiges Papier tropfte und die faszinierenden Form- und Farbverläufe beobachtete, die sich bei der Ausdehnung der Flüssigkeit einstellten, glaubte er allen Ernstes eine bisher unbekannte Kraft entdeckt zu haben. Dass bizarre, aber regelmäßige Konturen und leuchtende Farben vor den Augen des Betrachters entstehen – ohne sichtbare Ursache wie von Geisterhand gemalt –, schrieb er einem „Bildungstrieb“ zu, den er als „das Vorbild der in den Pflanzen und Tieren tätigen Lebenskraft“ ansah: „Diese neue bisher unbekannt gewesene Kraft – wird nicht durch ein Äußeres erregt oder angefacht, sondern wohnt den Stoffen ursprünglich inne“, schrieb er in seinem 1855 erschienenen Buch „Der Bildungstrieb der Stoffe veranschaulicht in selbständig gewachsenen Bildern“.

Die Nachwelt nimmt das wissenschaftliche Verfahren, das aus Runges Versuchen hervorging, die Papierchromatographie, dankend entgegen und schweigt nachsichtig über seine esoterischen Sprüche. Mögen seine Versuche und vor allem ihre Interpretation wissenschaftlich belanglos gewesen sein – künstlerisch sind sie von höchstem Interesse, auch wenn Runge selbst seinen Bildern allenfalls den Rang von „Professorenklexen“ einräumen mochte. Denn die Morphogenese – die Entstehung von Form und Gestalt – ist ein ureigenes Interessengebiet der bildenden Kunst.

Der Künstler nimmt dabei allerdings eine unübliche Rolle ein: Er ist nicht absichtsvoller Gestalter einer Form, sondern beschränkt sich darauf, in einem Prozess der Selbstorganisation die physikalischen ▶

Anfangs- und Randbedingungen zu setzen. Runges „Bildungstrieb der Stoffe“ ist hierfür beispielhaft. Die Strukturen entstehen aus sich selbst heraus, durch die Wechselwirkungen der Komponenten dieses Formbildungsprozesses.

Interessante Strukturen entstehen immer dann, wenn diese Wechselwirkungen nicht allzu einfacher Natur sind. Zumindest eine unter ihnen sollte die Eigenschaft haben, vorhandene Unterschiede zu verstärken: Wenn alle wirkenden Prozesse Ausgleichsprozesse sind, ist das Ergebnis so langweilig wie eine sauber gestrichene Wand. Die Wechselwirkungen, die in diesem Sinne für kreative Vielfalt verantwortlich sind, werden typischerweise in der Physik als nichtlinear oder gar chaotisch klassifiziert.

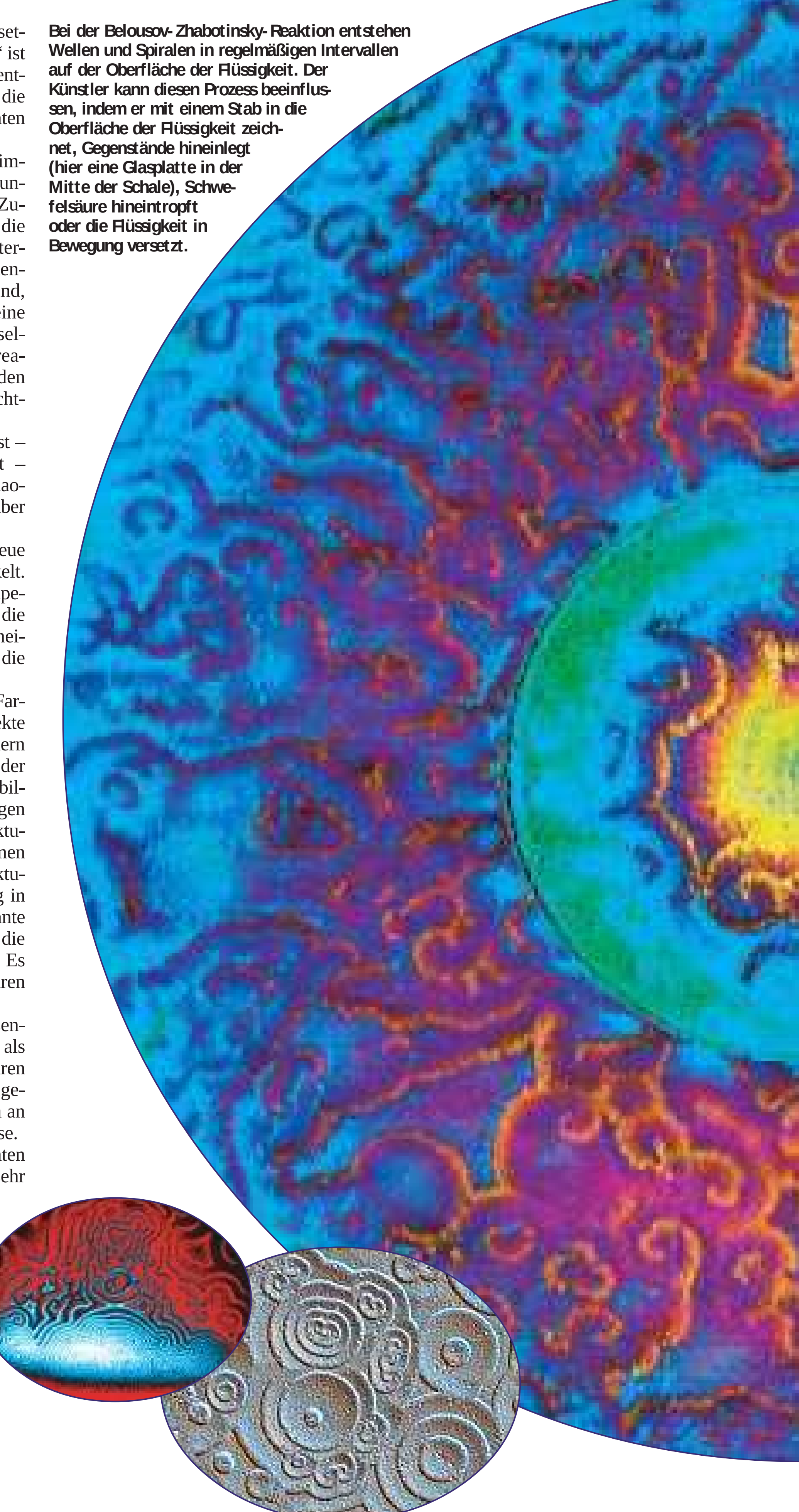
Die uns umgebende Wirklichkeit ist – zumindest da, wo sie interessant ist – ebenfalls nichtlinear, dynamisch und chaotisch. Insofern sind Bilder, die sich selber malen, auch Abbilder der Wirklichkeit.

In mehrjähriger Arbeit habe ich neue Verfahren der Bildherstellung entwickelt. Ausgehend von wissenschaftlichen Experimenten untersuche ich Prozesse, die selbstständig Muster bilden. Einige meiner Entdeckungen sind wiederum für die Wissenschaft von Interesse.

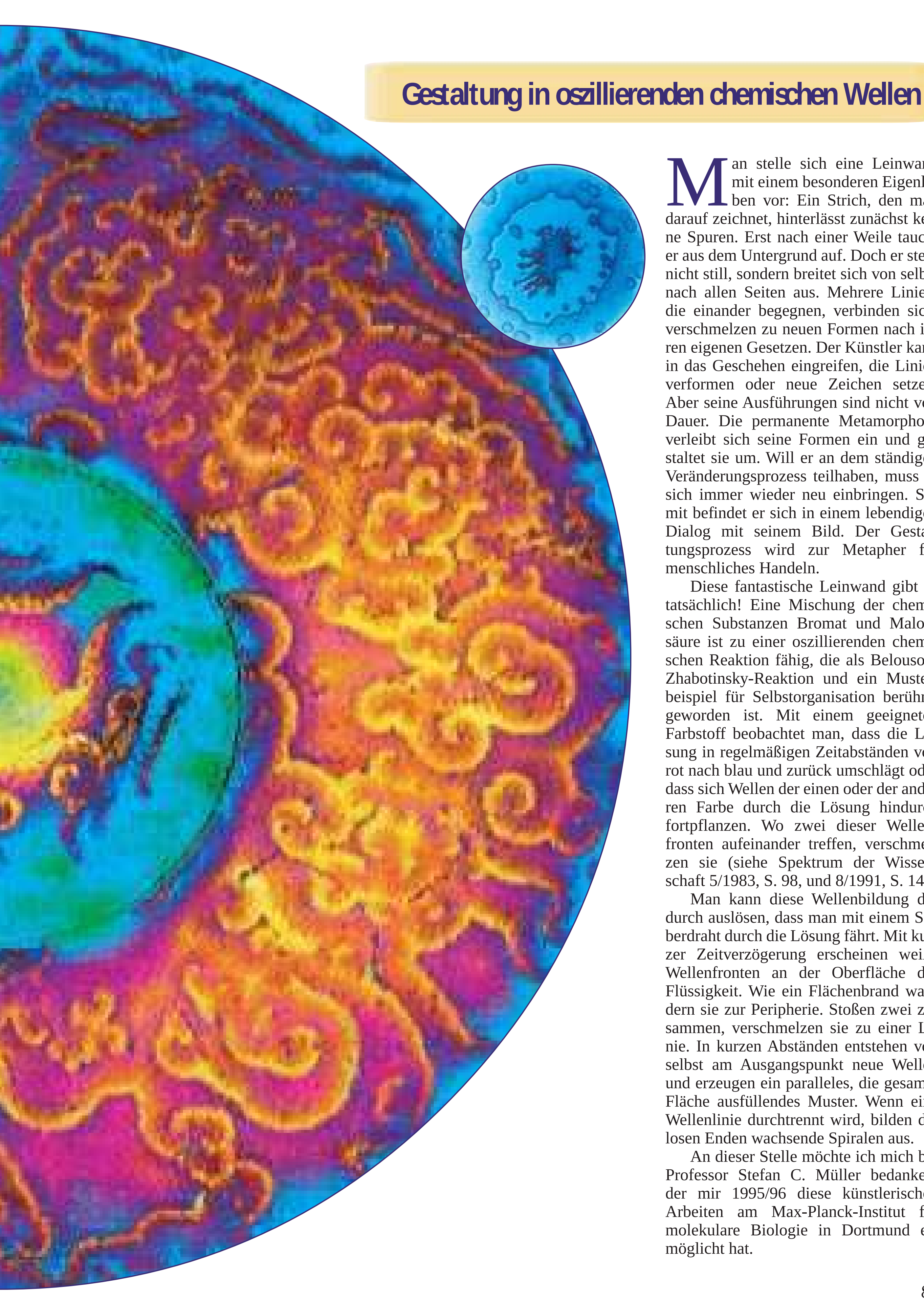
Die zu bemalende Fläche und die Farben sind für mich nicht passive Objekte meiner schöpferischen Tätigkeit, sondern interaktive dynamische Systeme mit der Fähigkeit, eigenständig Strukturen zu bilden. Unter physikalischen Einwirkungen wie Hitze und Druck entstehen Strukturen, wie sie auch in natürlichen Systemen vorkommen. Wellen, Blasen, Zellstrukturen, Dendriten breiten sich schlagartig in der Bildfläche aus. Bereits bekannte Techniken sind die Chromatographie, die Décalcomanie oder das Marmorieren. Es gibt jedoch auch völlig neue Verfahren (siehe auch SdW 5/1999, S. 144).

Das Verhältnis von Kunst und Wissenschaft ist bis heute eher antagonistisch als kooperativ. Doch in letzter Zeit mehren sich Zeichen der Annäherung. Ein gemeinsames Interesse besteht sicherlich an der Untersuchung nichtlinearer Prozesse.

Ich selbst erlebe, wie die Fronten merklich aufweichen. So bin ich zu sehr vielen wissenschaftlichen Veranstaltungen eingeladen worden, darunter zur Physikertagung in Jena und zu der Jahrestagung 2000 der Deutschen Mathematiker-Vereinigung in Dresden. Auch in der Kunstrichtung „Science Art“ stehe ich nicht allein: Herbert W. Franke und Manfred Kage betreiben schon lange die Wissenschafts-Kunst.



Bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion entstehen Wellen und Spiralen in regelmäßigen Intervallen auf der Oberfläche der Flüssigkeit. Der Künstler kann diesen Prozess beeinflussen, indem er mit einem Stab in die Oberfläche der Flüssigkeit zeichnet, Gegenstände hineinlegt (hier eine Glasplatte in der Mitte der Schale), Schwefelsäure hineintropft oder die Flüssigkeit in Bewegung versetzt.



Gestaltung in oszillierenden chemischen Wellen

Man stelle sich eine Leinwand mit einem besonderen Eigenleben vor: Ein Strich, den man darauf zeichnet, hinterlässt zunächst keine Spuren. Erst nach einer Weile taucht er aus dem Untergrund auf. Doch er steht nicht still, sondern breitet sich von selbst nach allen Seiten aus. Mehrere Linien, die einander begegnen, verbinden sich, verschmelzen zu neuen Formen nach ihren eigenen Gesetzen. Der Künstler kann in das Geschehen eingreifen, die Linien verformen oder neue Zeichen setzen. Aber seine Ausführungen sind nicht von Dauer. Die permanente Metamorphose verleibt sich seine Formen ein und gestaltet sie um. Will er an dem ständigen Veränderungsprozess teilhaben, muss er sich immer wieder neu einbringen. Somit befindet er sich in einem lebendigen Dialog mit seinem Bild. Der Gestaltungsprozess wird zur Metapher für menschliches Handeln.

Diese fantastische Leinwand gibt es tatsächlich! Eine Mischung der chemischen Substanzen Bromat und Malonsäure ist zu einer oszillierenden chemischen Reaktion fähig, die als Belousov-Zhabotinsky-Reaktion und ein Musterbeispiel für Selbstorganisation berühmt geworden ist. Mit einem geeigneten Farbstoff beobachtet man, dass die Lösung in regelmäßigen Zeitabständen von rot nach blau und zurück umschlägt oder dass sich Wellen der einen oder der anderen Farbe durch die Lösung hindurch fortpflanzen. Wo zwei dieser Wellenfronten aufeinander treffen, verschmelzen sie (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/1983, S. 98, und 8/1991, S. 14).

Man kann diese Wellenbildung dadurch auslösen, dass man mit einem Silberdraht durch die Lösung fährt. Mit kurzer Zeitverzögerung erscheinen weiße Wellenfronten an der Oberfläche der Flüssigkeit. Wie ein Flächenbrand wandern sie zur Peripherie. Stoßen zwei zusammen, verschmelzen sie zu einer Linie. In kurzen Abständen entstehen von selbst am Ausgangspunkt neue Wellen und erzeugen ein paralleles, die gesamte Fläche ausfüllendes Muster. Wenn eine Wellenlinie durchtrennt wird, bilden die losen Enden wachsende Spiralen aus.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Professor Stefan C. Müller bedanken, der mir 1995/96 diese künstlerischen Arbeiten am Max-Planck-Institut für molekulare Biologie in Dortmund ermöglicht hat.



Grenzflächendynamik, viscous fingering

Der Surrealist Oskar Dominguez (1906–1957) entdeckte 1934 beim Malen ein denkbar einfaches Verfahren, verblüffend natürliche Strukturen zu erzeugen: Er presste pastose Farbe mit einem Spachtel direkt auf die Leinwand. Beim Abziehen des Werkzeugs entstanden fein verästelte dendritische Strukturen. Auch sein Malerkollege Max Ernst (1891–1976) war von der Wirkung dieser naturnahen Formbildung angetan und setzte diese Maltechnik, genannt Décalcomanie, in seinen Bildern meisterhaft um.

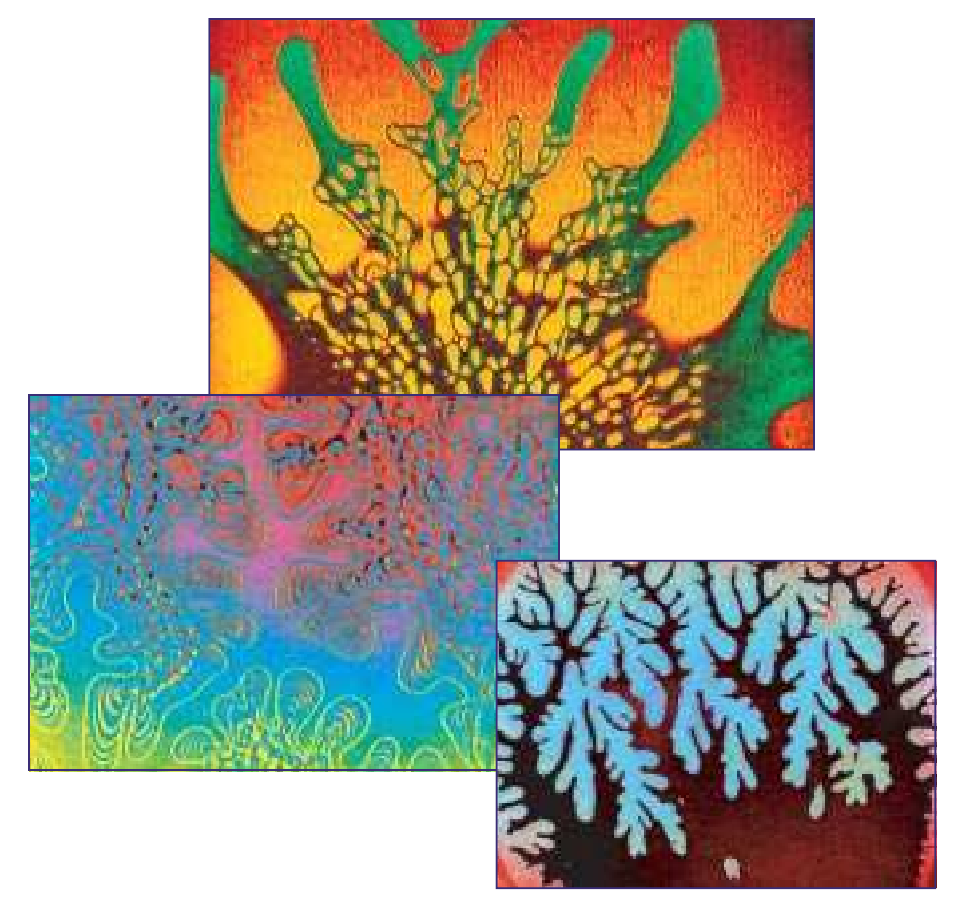
Physikalisch geschieht dabei Folgendes: Zwischen zwei parallelen Ebenen (im Beispiel Leinwand und Spachtel) befindet sich ein zähes (viskoses) Medium. Ein leichter bewegliches Medium (Luft) dringt in diesen Raum ein, zum Beispiel weil durch Auseinanderziehen der Platten ein Unterdruck entsteht. Dieses Eindringen fällt ihm überall dort leichter, wo es bereits zähes Medium verdrängt hat. Deshalb wächst sich eine kleine Luftblase zu einem langen Finger aus, und im Endeffekt schrumpft das zähe Medium zu einem mehr oder weniger dürren Baum zusammen. Das ist *viscous fingering* (Spektrum der Wissenschaft 1/1994, S. 72).

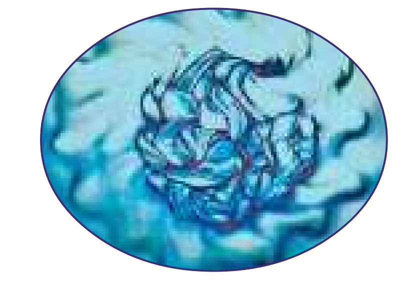
Ich habe dieses Verfahren für die künstlerische Gestaltung so verändert, dass sich die Musterbildung gezielt steuern lässt. Hierfür bringe ich die viskose Flüssigkeit zwischen zwei übereinander liegende Glasplatten und klappe die obere langsam hoch wie einen Buchdeckel. Der fingerartig sich verzweigende Rand zwischen Luft und Flüssigkeit erweckt den Eindruck, als würde man wachsende Pflanzen im Zeitraffer beobachten.

Durch Variation des Materials (Fett, Öl, Wasser, Tenside, Lösungsmittel oder gemischte Substanzen) und damit der Viskosität entstehen unterschiedlichste Muster. Bei geringer Viskosität sind die Muster nicht stabil, sie zerfließen. Um sie „am Leben“ zu erhalten, muss der Künstler ihnen Energie zuführen, indem er die Platten immer wieder auseinanderzieht. Durch rhythmisch pulsierende Bewegung, durch Drehen, Ziehen, Beschleunigen oder Pausieren interagiert der Künstler mit dem Geschehen.



Zieht man zwei Glasplatten, zwischen denen sich eine dünne Flüssigkeitsschicht befindet, ruckartig auseinander, so bilden die Ränder der Flüssigkeit ein fraktales Muster aus. Durch Wahl der Viskosität und der Geschwindigkeit beim Auseinanderziehen lässt sich diese Dynamik steuern.





Gestaltung durch Konvektionsströme

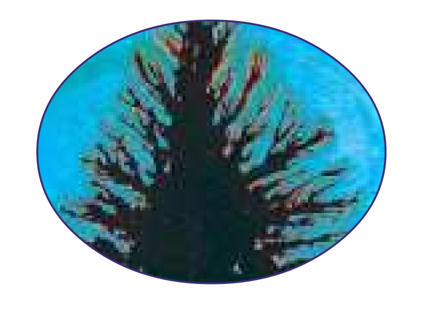
Das System der Konvektionsströme lässt sich über zahlreiche Parameter gezielt beeinflussen, unter anderem die Füllhöhe, die Gefäßform, die zugeführte Energiemenge und den Temperaturunterschied zwischen unterer und oberer Schicht. Besonders wirkungsvoll ist es, das ganze System in Rotation zu versetzen.

Erhitzt man eine Flüssigkeit von unten, so wollen die unteren, wärmeren und daher leichteren Flüssigkeitsteile gewissermaßen nach oben, kommen aber nicht ohne weiteres an den kalten, schweren vorbei. Nach einer Weile löst die Flüssigkeit das Problem, indem sie regelmäßige Strömungsmuster ausbildet. Diese Bénard-Konvektion (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1980, S. 119) ist ein Paradebeispiel für spontane Strukturbildung aus an sich strukturlosen Anfangs- und Randbedingungen.

Die Struktur wird nur durch einen fortwährenden Energiefluss aufrechterhalten: durch „Dissipation“ von Energie in der Sprache des Brüsseler Chemikers Ilya Prigogine. Sowie die Energiezufuhr aussetzt, bricht die Struktur zusammen. Prigogine stellte auch heraus, dass die Bénardschen Konvektionszellen genau diese Eigenschaft – Aufrechterhaltung von Ordnung durch Energiedissipation – mit lebenden Organismen gemeinsam haben.

Dissipative Systeme besitzen eine eigene Kreativität, denn sie entwickeln selbstständig eine große Vielfalt verschiedener Muster. Durch den Eingriff in die Eigendynamik wird der Künstler zu einem der Parameter des Gestaltbildungsprozesses. Anders als in wissenschaftlichen Untersuchungen strebt man in der künstlerischen Arbeit nicht danach, Störungen des Systems zu eliminieren, sondern sie gezielt für die Gestaltung einzusetzen. Ungleichmäßige Wärmezufuhr, Kühlung an einzelnen Stellen oder Verrühren der Flüssigkeit machen sich in komplexen Gestalten bemerkbar. Die schnell wechselnden Muster bestechen durch überraschend ungewöhnliche und originelle Formbildung.

Musterbildung durch Oberflächenspannung



Diese Bilder sind nach demselben Verfahren entstanden wie die auf Seite 78/79, nur ist die Trägerschicht nicht Tensid, sondern mit Kleister angedicktes Wasser. Ein Tropfen Farbe, auf die Schicht gegeben, dehnt sich aus, wobei seine zunächst glatte Grenzlinie in ein fraktales Muster übergeht. Die Vielfalt der Muster ergibt sich aus der unterschiedlichen Oberflächenspannung der Pigmente sowie den verschiedenen Bindemitteln und Zusatzstoffen der Farbsubstanzen.

Ausgangspunkt meiner Untersuchungen ist die jahrhundertealte Technik des Marmorierens. Auf eine wässrige Trägerschicht, die mit Kleister angedickt ist, werden Pigmente aufgetragen. Sie breiten sich auf der Oberfläche schwimmend aus. Mit verschiedenen Werkzeugen lassen sich die Farben zu mitunter marmorähnlichen Mustern verziehen.

Mit dem bloßen Auge betrachtet sind diese Muster wenig spektakulär. Man müsste sie unter dem Mikroskop ansehen; aber dafür ist das System – man braucht mindestens die Größe einer Petrischale – zu sperrig. Erst mit transparenten Flüssigkeiten und einem Tageslichtprojektor als Vergrößerungsgerät zeigen sich (teilweise filigrane) Strukturen und Bewegungsabläufe in ungeahnter Vielfalt und Dynamik.

Die Muster bilden sich spontan aus und befinden sich in einem beständigen Umformungsprozess. Das Geschehen erinnert in seiner lebendigen Dynamik an biologische Wachstumsprozesse. Durch die über 30fache Vergrößerung aller Längen bei der Projektion wachsen die projizierten Muster in Sekundenschnelle auf mehrere Meter Größe an. Die Bewegungsdynamik lässt sich in Bildern nicht darstellen, wohl aber die Vielfalt der Erscheinungsformen (Bilder auf dieser Doppelseite).

Ich löse diese Strukturbildungsprozesse aus, indem ich Lösungsmittel und Farbpigmente auf eine wässrige oder ölige Unterlage tropfe. Mit verschiedenen Zusatzstoffen wie Alkohol und Tensiden, die sich auf die Oberflächenspannung auswirken, kann ich die Musterbildung beeinflussen. Dieses System liefert je nach Wahl der Inhaltsstoffe nicht nur eine Vielzahl verschiedener physikalischer Reaktionen – darunter auch Konvektionsströme –, sondern auch eine große Menge sehr unterschiedlicher Strukturen wie Verästelungen (Dendriten), Blattformen (*viscous fingering*), Zellstrukturen oder pulsierende Gewebemuster.

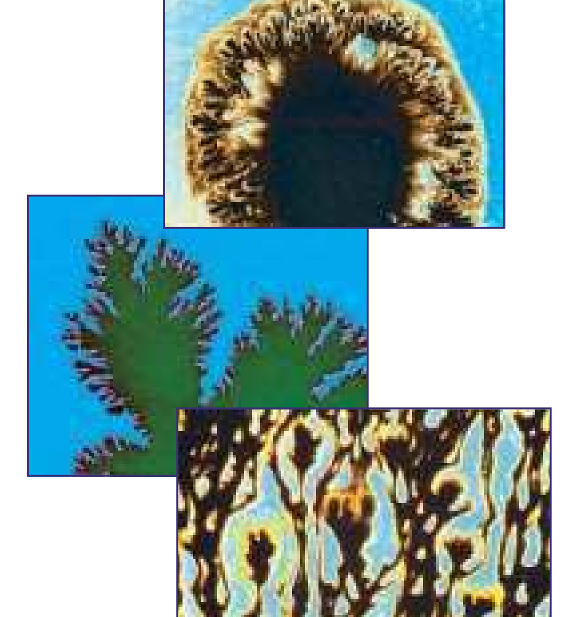
Eine Zeit lang habe ich ausschließlich die Dynamik der Dendritenbildung untersucht, um die gestaltbildenden Parameter des Wachstumsprozesses zu finden und gezielt zu beeinflussen. Lassen sich zum Beispiel die Dicke der Äste, der Verzweigungswinkel, die Geradlinigkeit oder Krumpligkeit der Äste oder die Ausbildung von blattartigen Verdickungen gezielt verändern? Mit der Zeit verwandelte sich mein Atelier zunehmend in ein Labor, in dessen Petrischalen immer neue Mutanten einer flüssigen Flora erzeugt wurden.

Die Ausgangssituation war immer die gleiche: Auf eine Trägerschicht aus Kleister wurden unterschiedliche Pigmente getropft. In den meisten Fällen blieb der Tropfen einfach liegen und bildete eine kreisrunde Form. Manchmal franste jedoch die Grenzlinie aus, und die Fransen wuchsen zu Ästen heran. Wie ich beobachten konnte, bestimmte die Fließgeschwindigkeit mit darüber, wie dick die Verästelungen wurden. Daraufhin variierte ich gezielt diese Geschwindigkeit durch Veränderung der Viskosität, indem ich die Mischungsverhältnisse von Wasser, Alkohol, Lösungsmittel und anderen Zutaten veränderte. Das entschied dann, ob fein strukturierte Gräser oder fleischige Kakteen in der Petrischale wuchsen.

Ein weiterer Parameter der Gestaltbildung ist eine Substanz, die sich während der Ausbreitung absondert und eine Haut auf der Oberfläche bildet. Durch sie erstarrt allmählich der Farbfluss, und Dendriten, die zunächst wie schmale schlanke Pappeln wuchsen, fangen an zu schrumpfen und verwandeln sich in breit ausladende knorrige Eichen. Erhöht man den Anteil der hautbildenden Substanzen, so sprießen an den Spitzen der Verzweigungen große schrumpelige Blätter wild wuchernder Kräuter. Viele weitere Einflussmöglichkeiten habe ich entdeckt und noch längst nicht erschöpfend erforscht. ■

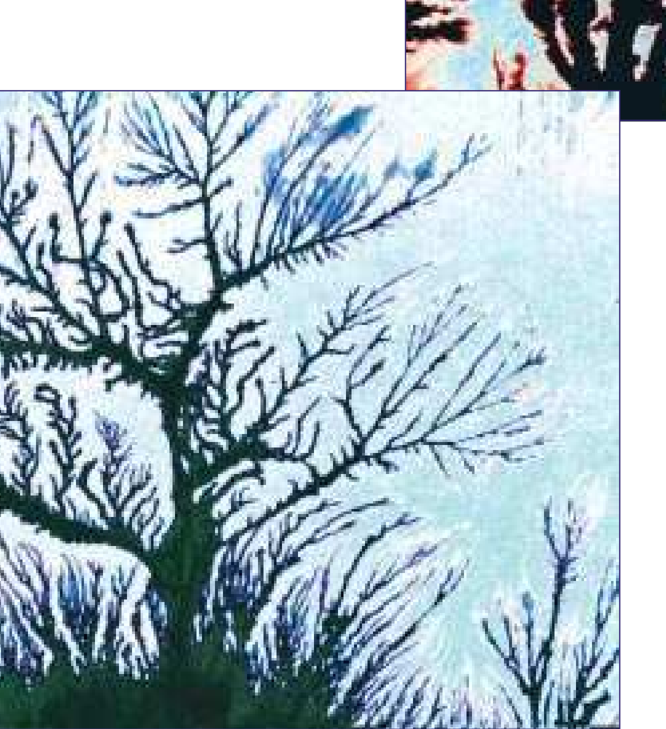
Volkhard Stürzbecher *hat von 1966 bis 1972 die Kunstakademie in Karlsruhe besucht und 1976/77 an der Universität von San José (Kalifornien) den Titel „Master of Arts“ erworben. Seit 1978 lebt und arbeitet er in Neustadt an der Weinstraße. Mit den hier beschriebenen Techniken ist er bei zahlreichen Ausstellungen und Live-Vorführungen aufgetreten, darunter erst kürzlich im Zentrum für Kunst und Medientechnologie (ZKM) in Karlsruhe.*







Die Farbigkeit der Bilder entsteht durch Nachbearbeitung im Computer. Die Falschfarbendarstellung macht die Dichteunterschiede innerhalb der Flüssigkeit sichtbar.



Spektrum-Report:

Spuren des Lebens

Archäologische Überreste von Menschen, Pflanzen und Tieren sind ein vergängliches und daher umso wertvolleres Gut. Naturwissenschaftliche Methoden entlocken den Knochen, Zähnen, Haaren oder Pflanzenfasern neue Informationen.

DENDROCHRONOLOGIE

Bäume als Zeitzeugen

Über 12000 Jahre in die Vergangenheit reichen die Jahrringmuster archäologischer Hölzer. Damit lassen sich unbekannte Funde einordnen und Radiokarbondaten eichen.

Von Marco Spurk, Michael Friedrich und Bernd Kromer

Der Wechsel der Jahreszeiten ist ein Segen für die Wissenschaft, denn Bäume bilden in unseren gemäßigten Klimazonen Jahrringe aus, und die eignen sich als Kalender. Im Frühling wachsen im Stamm große, dünnwandige Zellen für den Wassertransport, im Spätsommer kleine, dickwandige, die für die nötige Stabilität sorgen. So manifestieren sich aufeinander folgende Jahre als abrupte Übergänge im Holzquerschnitt – eben als Jahrringe. War das Jahr gut für den Baum, konnte er viel Masse bilden, und der Ring ist breiter als beispielsweise in einem trockenen Jahr. Deshalb bilden den Folgen dieser Ringe charakteristische Muster, die bei gleichzeitig gewachsenen Bäumen einer Art und Region weitgehend übereinstimmen.

Der Astronom A. E. Douglass (1867–1962), zuletzt an der Universität von Arizona in Tucson tätig, erkannte das als Erster. Er untersuchte Bäume in der Hoffnung, Sonnenfleckenzyklen in den Ringbreiten wieder zu finden. Dabei entdeckte er Ähnlichkeiten in den Jahrringmustern gleichzeitig gewachsener Exemplare. Der Umkehrschluss lag nahe, und anhand von Bäumen bekannten Alters konnten Wissenschaftler nun andere Hölzer jahrgenau datieren, indem sie die Jahrringmuster zur Deckung brachten. In den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts etablierte der Forstbotaniker Bruno Huber an der Technischen Universität Tharandt bei Dresden die Methode in Europa. Sein Schüler, der Forstbotaniker Bernd Becker, begann in den siebziger Jahren an der Universität Hohenheim bei Stuttgart die längste Jahrringchronologie der Welt aufzubauen. Über 10000 einander überlappende Muster von Eichen wurden vermessen, zur Deckung gebracht und so Stück für Stück zu einer Chronologie gemittelt. Den einzelnen Baum betreffende Ereignisse wie Schädlingsbefall, Schneebruch oder Blitzschlag filtert man durch die Vielzahl an Jahrringmustern heraus. Mittlerweile gibt es weltweit Datierungskurven für verschiedene Holzarten und Regionen.

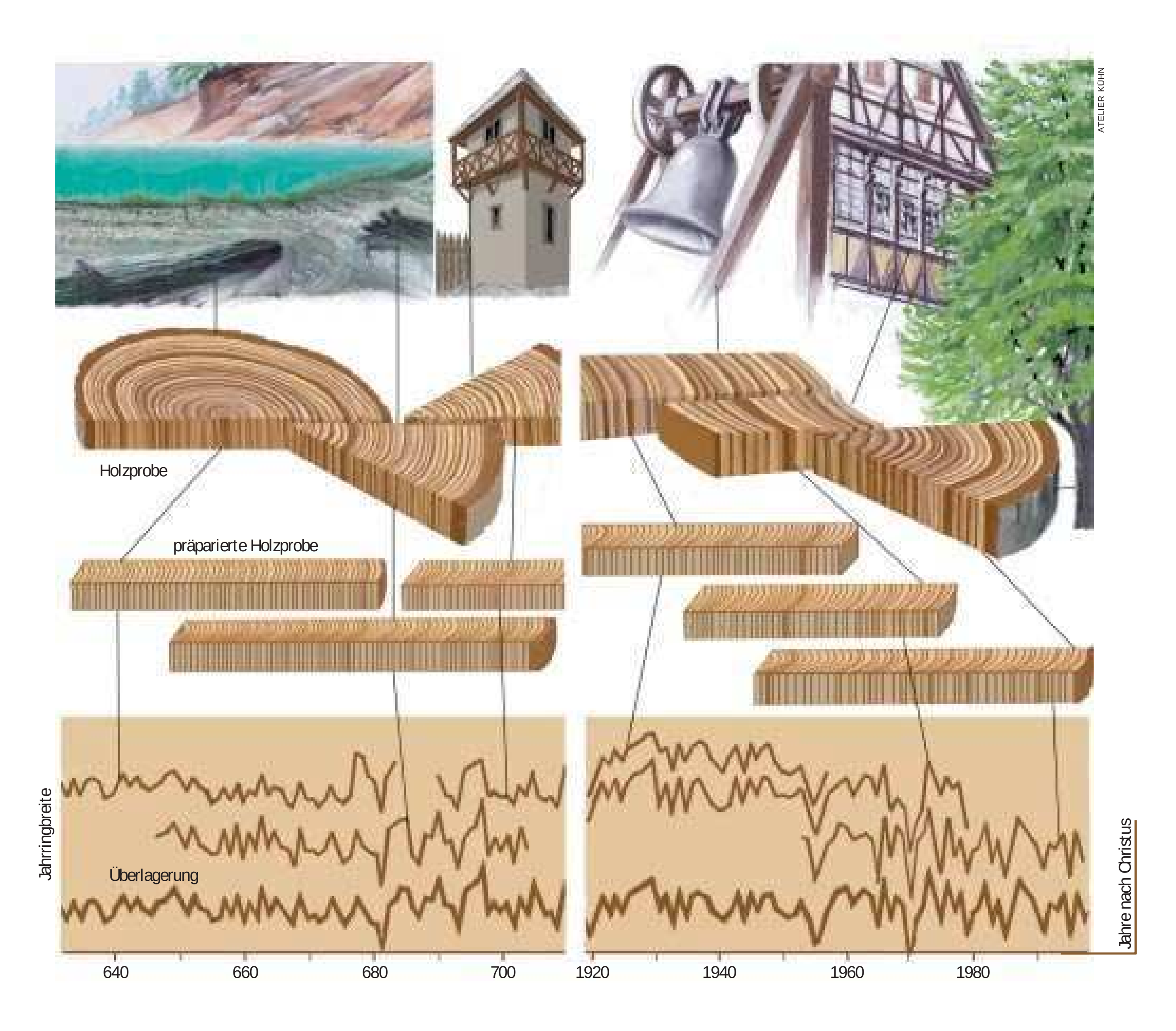
Bevor eine solche Datensammlung steht, müssen Proben entnommen, präpariert und vermessen werden. Für den Aufbau von Chronologien sägen wir Scheiben aus frisch gefällten Stämmen, aus Balken alter Gebäude und aus Hölzern archäologischer Grabungen. Können keine Scheiben gewonnen werden, weil beispielsweise ein Balken tragende Funktion hat, verwenden wir Hohlbohrer; deren Bohrkerne enthalten aber unter Umständen Wachstumsstörungen.

Im Labor werden die Scheiben in handliche Stücke zersägt und die Ringe entlang mehrerer Radien mit Rasierklingen sichtbar gemacht. Mit stark vergrößernden Stereolupen auf hochpräzisen Messtischen vermessen wir deren Ringbreiten. Die so gewonnenen Daten werden dann abgeglichen und im Computer gemittelt – eine Jahrringkurve entsteht. Sie wird mit einer bestehenden Chronologie verglichen und so datiert. Dann



Präparierte Scheibe einer 4000 Jahre alten Eiche

JÖRG HEIMANN



Aus den Jahrringen subfossiler Bäume, alter Bauhölzer und gefällter Stämme werden Kurven der Ringbreiten gewonnen und zu einer Chronologie zusammengefügt.

kann man sie dieser hinzufügen, um die Statistik zu verbessern oder gar den Datensatz zu verlängern.

Für vieltausendjährige Chronologien verwenden wir in gleicher Weise auch „subfossile" Bäume. Das sind Exemplare, die einst in Mooren oder Flusstälern umstürzten und dann im nassen Milieu eingeschlossen wurden. Das hielt Sauerstoff weitgehend fern und verhinderte so den Abbau des Holzes durch Mikroben. Moor-Eichen kommen immer wieder bei der Entwässerung von Feuchtgebieten zu Tage, Fluss-Eichen und -Kiefern bei der Kiesförderung. Aus den Stämmen, die 15 Meter lang und 1,5 Meter dick sein können, sägen wir Scheiben möglichst nahe der Wurzel heraus, um viele Ringe zu gewinnen.

Die Analyse der Wachstumsverhältnisse, Holzarten und Fundhäufung solcher Bäume lässt sogar Rückschlüsse auf das Aussehen einstiger Urwälder zu. Kiefern wuchsen in unseren Flusstälern in der ausgehenden Eiszeit, also seit etwa 14 500 Jahren, wurden aber vor etwas mehr als 10 000 Jahren mit dem Ansteigen der Temperaturen von Eichen verdrängt. Diese dominierten bis ins frühe Mittelalter, dann kamen Ulme, Pappel und Weide hinzu. Vermutlich hatte der Mensch die Bestände des hochwertigeren Baumes reduziert. Die Täler waren aber nicht immer mit dichtem Wald bedeckt. Schon während der Bronzezeit gab es Phasen der Auflichtung, möglicherweise ebenfalls ein Indiz für den Einfluss des Menschen.

Auch Hinweise auf kurz- und langfristige Klimaschwankungen sowie Änderungen der Umwelt sind im Holz gespeichert: Stabile Isotope von Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff kommen in bestimmten Konzentrationen in der Luft und im Wasser vor und werden von Pflanzen in die Zellulose eingebaut, wobei sie das leichtere Isotop bevorzugen. Wenn die Bäume bei Hitze und Trockenheit die Spaltöffnungen ihrer Blätter schließen, um die Verdunstung zu verringern, steigt der Anteil am schweren Isotop. Diese Verhältnisse lassen sich im Holz messen und so Änderungen der ▶



ALLE FOTOS: JÖRG HEIMANN

Wo geforscht wird, fallen Späne: Probenentnahme an einer 10 000 Jahre alten Kiefer (links). Zum Glätten dient eine Rasierklinge (oben links), auch optisch beeindruckt das Ergebnis auf dem großen Bild.

Umwelt jahrgenau rekonstruieren. So belegt der kontinuierliche Anstieg von schwerem Kohlen- und Wasserstoff in Kiefernholz für die Dauer von hundert Jahren den zunehmenden Stress, dem die Bäume durch die Erwärmung vor etwa 11 400 Jahren ausgesetzt waren.

Darüber hinaus haben Jahrringchronologien die Radiokarbonmethode geeicht, seinerseits ein Verfahren der Altersbestimmung von organischem Material: Das radioaktive Kohlenstoff-Isotop ^{14}C wird in der oberen Atmosphäre durch kosmische Strahlung gebildet, von lebenden Organismen aufgenommen und in ihr Zellgerüst eingebaut. Das Verhältnis von ^{14}C zu dem häufigeren und stabilen ^{12}C im Lebewesen entspricht zu diesem Zeitpunkt dem in der Atmosphäre. Nach dem Tode wird kein radioaktives Isotop mehr eingelagert, die vorhandene Menge zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren (nach dieser Zeit hat sich die Konzentration daran jeweils halbiert); 50 000 Jahre später ist es nicht mehr nachweisbar. Bis dahin aber lässt sich die Relation von ^{14}C zum stabilen ^{12}C bestimmen und mit dem Verhältnis in der Atmosphäre vergleichen, mithin also das Alter einer Probe ermitteln – vorausgesetzt, die Atmosphäre enthielt in den vergangenen 50 000 Jahren stets dieselbe Konzentration an ^{14}C. Das war aber nicht der Fall. Vor allem entstand mehr davon bei schwächerem Erdmagnetfeld oder geringerer Sonnenaktivität, während in die Tiefe absinkende Meeresströmungen je nach Stärke der Ozeanzirkulation unterschiedlich viel ^{14}C aus der Atmosphäre entnommen haben. Deshalb waren Radiokarbon-Datierungen lange wenig verlässlich, bestimmten beispielsweise das Alter von altägyptischen Hölzern zu jung im Vergleich zur Datierung anhand schriftlicher Belege.

Altes Holz im Tagebau

Dendrochronologisch datierte Hölzer boten sich zur Korrektur an. Für mittlerweile 12 000 Jahre lassen sich Radiokarbon- in Kalenderjahre umrechnen. Eine solche kalibrierte Altersangabe kann heute auf wenige Jahrzehnte genau sein. Die Kalibrationskurve eignet sich auch dazu, in Verbindung mit Daten aus Eisbohrkernen oder See- und Meeresablagerungen die Einflüsse von Sonnenaktivität und Meeresströmungen auf das Klima der Vergangenheit zu erforschen.

Derzeitig arbeiten wir an der Verlängerung der Jahrringchronologie, um noch weiter in die letzte Eiszeit zu gelangen. Möglichkeiten dafür bietet beispielsweise der Braunkohle-Tagebau in Brandenburg und Sachsen. Dort werden riesige Flächen geöffnet und alte Sedimente damit zugänglich. Mitte der neunziger Jahre entdeckten Archäologen im Vorfeld des Tagebaus Cottbus-Nord Schichten mit Überresten von lichten Kiefern-Birken-Wäldern, die einst auf sandigen Böden wuchsen. Die aus den Kiefern erstellte Chronologie umfasste mehr als 300 Jahre und begann vor über 12 000 Jahren, also am Ausgang der letzten Eiszeit. Als noch älter erwies sich ein Fund im sächsischen Tagebau Reichwalde. Seit 1995 decken Archäologen dort ein Moor ab, das ebenfalls einen Kiefern-Birken-Wald konserviert hatte. Diese Kiefernchronologie erstreckt sich sogar über 1000 bis 1500 Jahre, das ^{14}C-Alter beträgt 14 300 bis 12 900 Jahre.

Aus diesem „Spätglazial“ gibt es weitere Jahrringchronologien aus Süddeutschland, der Schweiz und Nord-Italien. In Zusammenarbeit mit dem Schweizer Geographen K. F. Kaiser, Gymnasiallehrer und Dozent in Hohenheim, wollen wir sie zu einem lückenlosen Jahrringkalender der letzten 15 000 Jahre kombinieren, um vergangene Klimata zu rekonstruieren und so aktuelle Entwicklungen besser zu verstehen. ■

*Der Botaniker **Marco Spurk** (rechts) leitete zwischen 1994 und 2000 das Jahrringlabor an der Universität Stuttgart Hohenheim. **Michael Friedrich** (links) ist Agrarbiologe; er promoviert in Hohenheim über späteiszeitliche Chronologien und übernahm in diesem Jahr die Laborleitung. Der Physiker **Bernd Kromer** führt das Radiokohlenstofflabor der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.*



DNA-ANALYSE

Das Rätsel der „unbekannten Frau“

Molekulare Genetik erschließt DNA aus archäologischen Funden – etwa für Verwandtschaftsanalysen; und diese bergen mitunter Überraschungen.

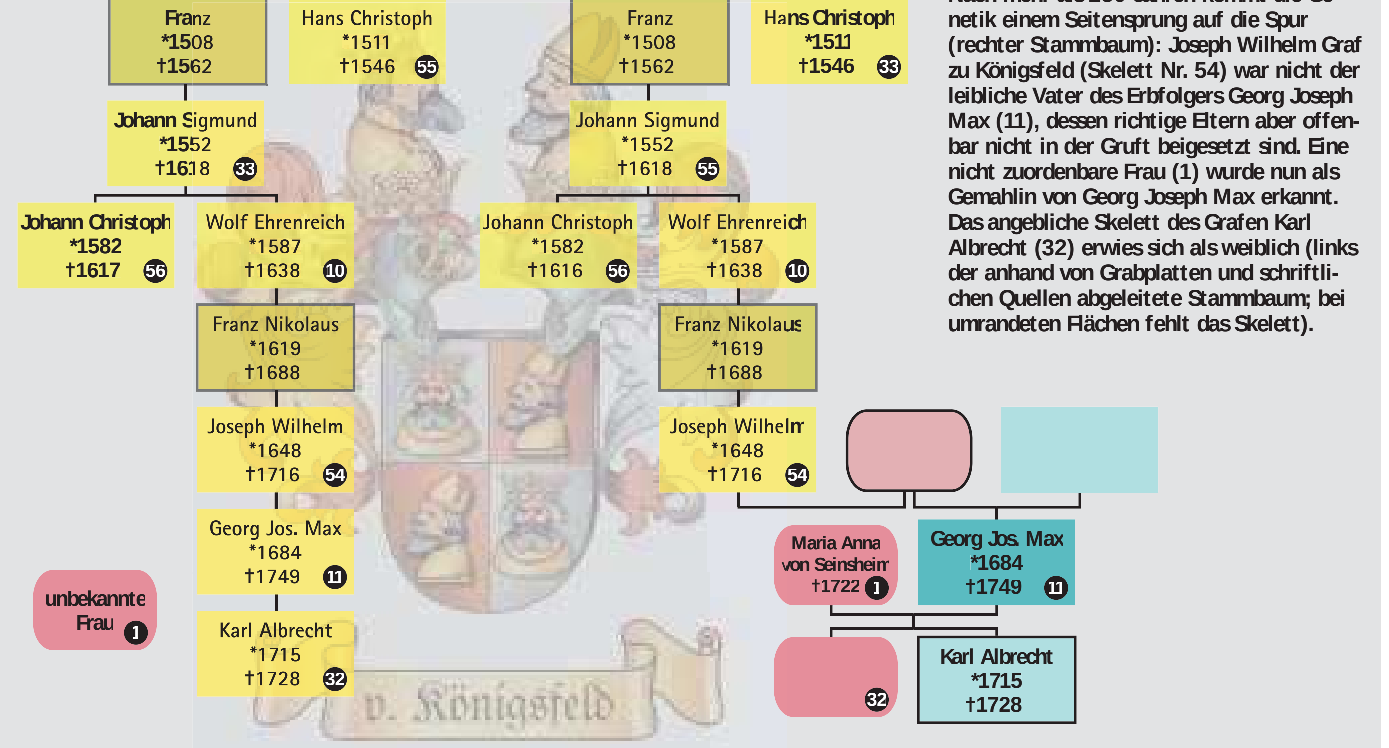
Von Bernd Herrmann und Susanne Hummel

Noch vor wenigen Jahren erschien es so unwahrscheinlich, Erbsubstanz aus archäologischen Funden zu gewinnen, wie das Klonen von Dinosauriern in „Jurassic Park“. Das änderte sich 1985 mit der Erfindung der Polymerase-Kettenreaktion, dem heute routinemäßig eingesetzten Kopierverfahren für ausgesuchte DNA-Abschnitte. Selbst sehr geringe Ausgangsmengen lassen sich damit für Analysen ausreichend vervielfältigen. Die möglichen Anwendungen in der Archäologie sind Legion: Fragmente von Schriftstücken lassen sich molekulargenetisch besser zuordnen, die Farben von Höhlenmalereien auf organische Pigmente untersuchen, Familienzugehörigkeiten in Gräbern aufstellen. Allerdings ist das Arbeiten mit alter Erbsubstanz (ancient DNA, aDNA) so anspruchsvoll, dass derzeit nur wenige spezialisierte Arbeitsgruppen über die nötigen Techniken und speziellen Kenntnisse verfügen.

Die DNA speichert den Bauplan und die physiologischen Prinzipien der Lebensabläufe für den gesamten Organismus. Sie kommt in jeder Zelle mehrfach vor: im Zellkern (nukleare DNA) und in ihren „Kraftwerken“, den Mitochondrien des Zellplasmas (mitochondriale DNA). Erstere eignet sich beispielsweise, um ein Individuum zu identifizieren; man spricht vom genetischen Fingerabdruck.

Der Grund: Bei der Verschmelzung von Ei und Samen werden die Erbanlagen der Eltern zu einem unverwechselbaren neuen genetischen Muster vermischt. Zugleich lässt sich auch die väterliche Linie rekonstruieren, denn Teile des Y-Chromosoms gelangen unverändert von Vätern zu den Söhnen. Dagegen wird die mitochondriale DNA nur über die Mutter vererbt – alle Nachkommen in ihrer Linie zeigen demnach gleichartige genetische Muster in dieser Erbsubstanz. Zudem charakterisieren bestimmte Abschnitte der mitochondrialen DNA die biologische Art, der ein Individuum angehört.

Ein Beispiel dazu: Anhand schriftlicher Quellen erstellten Genealogen einen Familienstammbaum der Grafen von Königsfeld (Bayern), eines Adelsgeschlechts, das zu Beginn des 16. Jahrhunderts seinen Anfang nahm und zwei Jahrhunderte andauerte. Skelette in der Familiengruft konnten über Inschriften der Grabtafeln diesem historischen Stammbaum zugeordnet werden, nur das einer Frau war nicht zu identifizieren. Zur Kontrolle wurde DNA aus den Knochen extrahiert und analysiert. Nun fand nicht nur die Unbekannte ihren Platz im Stammbaum, es gab auch einige Überraschungen: So waren offensichtlich zu einem unbekannten Zeitpunkt Grabplatten ▶



Stammbaumkorrektur

Nach mehr als 250 Jahren kommt die Genetik einem Seitensprung auf die Spur (rechter Stammbaum): Joseph Wilhelm Graf zu Königsfeld (Skelett Nr. 54) war nicht der leibliche Vater des Erbfolgers Georg Joseph Max (11), dessen richtige Eltern aber offenbar nicht in der Gruft beigesetzt sind. Eine nicht zuordenbare Frau (1) wurde nun als Gemahlin von Georg Joseph Max erkannt. Das angebliche Skelett des Grafen Karl Albrecht (32) erwies sich als weiblich (links der anhand von Grabplatten und schriftlichen Quellen abgeleitete Stammbaum; bei umrandeten Flächen fehlt das Skelett).

WAPPENSTUDIO URLAUB / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



DR. J. BURGER

DR. J. BURGER

In vorspanischer Zeit malten Indianer einen sieben Meter langen Puma auf einen Fels im heutigen Texas (oben). Der Analyse alter Erbsubstanz zufolge verwendeten sie für die Pigmente Pflanzen, als Bindemittel Tierblut. Die Genetik erleichtert auch die Zuordnung von Pergament-Stücken.

vertauscht und deshalb in der Genealogie einige Skelette falsch zugeordnet worden. Vor allem aber wurde eine bis dahin unbekannte Unterbrechung der väterlichen Linie im 17. Jahrhundert entdeckt. Offensichtlich hatte eine der Gräfinnen eine Liebschaft mit einem Unbekannten, aus der dann der offizielle Erbfolger entspross.

Für solche Untersuchungen muss zunächst die aDNA aus der Probe entnommen werden. Dabei bestimmt mehr die Qualität des Extrakts als seine absolute Menge über den Erfolg der anschließenden Vervielfältigung mittels Polymerasekettenreaktion (PCR, siehe dazu Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 117). Diese basiert vor allem auf synthetisch hergestellten DNA-Abschnitten, so genannten Primern.

Deren Sequenz, also die Abfolge der Basen genannten Bausteine der DNA, entspricht bestimmten, für die jeweilige Fragestellung charakteristischen Abschnitten der Erbsubstanz. Kommen diese im Extrakt vor, werden die Primer daran ankoppeln. Sodann fungieren sie als Starter-Moleküle für die Vervielfältigung, an deren Ende – hoffentlich – eine ausreichende Menge der gesuchten aDNA-Sequenz für die folgenden Analysen zur Verfügung steht.

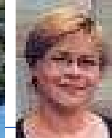
Scheitert dieses Vorhaben, enthielt das Extrakt vielleicht Substanzen, die eine PCR hemmen. Die häufigste Ursache dürfte aber ein schlechter Erhaltungszustand der aDNA sein. Während Erbsubstanz aus frisch gewonnenem Blut viele tausend Basenpaare lang sein kann, sind es bei archäologischen Funden je nach den Bedingungen der Fundsituation und Aufbewahrung – das absolute Alter hat einen geringeren Einfluss – meist nur noch wenige hundert. Unter Umständen finden die Primer dann keine intakte Zielsequenz mehr.

Umgekehrt bedeutet eine erfolgreiche Vervielfältigung keineswegs, dass die Probe die gesuchte aDNA enthielt. Das hochsensible Verfahren kopiert auch Verunreinigungen, also DNA an oder in der Probe, die nicht zum fraglichen Gewebe gehörte. Deren Quellen sind schnell genannt: Etwa im Boden lebende Mikroorganismen aus der unmittelbaren Umgebung des Fundortes, vor allem aber Archäologen, Restauratoren und Molekularbiologen selbst, die ja mit den Artefakten in Berührung kommen. Da sich solche Verunreinigungen an der Oberfläche des Probenmaterials befinden, müssen zunächst alle außen liegenden Flächen des Fundstücks entfernt werden.

Um die Authentizität der Ergebnisse einer PCR-Analyse sicher zu stellen, werden außerdem mehrere Proben von verschiedenen Stellen eines Fundstückes untersucht.

Diese Technik erweitert die Möglichkeiten der Archäologen, findet aber auch andere Liebhaber: Mit den Verfahren lassen sich geringe Spuren gentechnisch veränderter Pflanzen nachweisen oder die Deklaration der in Nahrungsmitteln verarbeiteten Tiere und Pflanzen überprüfen. Die Biodiversitätsforschung sucht mittels aDNA-Analytik nach wirtschaftlich wertvollen genetischen Informationen in Exemplaren museal aufbewahrter alter Sorten oder Landrassen. Das weitere Spektrum der Anwendungen reicht von der Kriminaltechnik bis hin zu Brauch- und Abwasserkontrollen. ■





Die Anthropologen **Bernd Herrmann** *und* **Susanne Hummel** *leiten in der Abteilung Historische Anthropologie und Humanökologie der Universität Göttingen eine Arbeitsgruppe für aDNA-Forschung.*

PROTEINCHEMIE

Fleisch, Fisch oder Gemüse?

Im Knochen eingeschlossen können Eiweißmoleküle Millionen Jahre überdauern. Insbesondere Stickstoff-Isotope im Kollagen geben Auskunft über den Alltag längst vergangener Generationen.

Von Gisela Grupe

Was wäre der Mensch ohne Kollagen? Dieses fadenförmige Eiweißmolekül vernetzt sich mit seinesgleichen in den Räumen zwischen den Knochenzellen und bildet so ein belastbares Gerüst, dem eingelagerte Mineralkristalle dann Härte geben. Ob ein Mensch Zeit seines Lebens harte Arbeit verrichten musste, dabei eher stand oder saß, können Anthropologen an Form und Verschleiß von Knochen ablesen (Spektrum der Wissenschaft 10/1994, S. 98). Wie er sich ernährt hat, das ermitteln Biochemiker aus dem Kollagen.

Dass sich dieses Protein und seine Grundeinheiten, die Aminosäuren, über Jahrmillionen erhalten können, verdanken sie den Mineralien im Knochen. Die lagern sich um das Kollagen, ummanteln und verdecken es, sodass es Mikroorganismen schwerer haben, an diese Nahrungsressource zu kommen.

Aminosäuren sind vor allem Verbindungen aus Kohlenstoff- und Stickstoffatomen (chemisch C und N). Für die Archäometrie ist nun bedeutsam, dass diese beiden Elemente in der Natur in Form von zwei stabilen Isotopen vorkommen: meist als leichtere ^{12}C und ^{14}N, deutlich seltener aber auch als ^{13}C und ^{15}N. Isotope sind Spielarten eines Elementes, die sich nur in der Zahl der Neutronen des Atomkerns unterscheiden. Weil dieser die Masse bestimmt und manche Enzyme durchaus leichte oder schwere Versionen eines Moleküls unterschiedlich behandeln, trennt der Stoffwechsel der Lebewesen die Isotope voneinander: Innerhalb der Nahrungskette

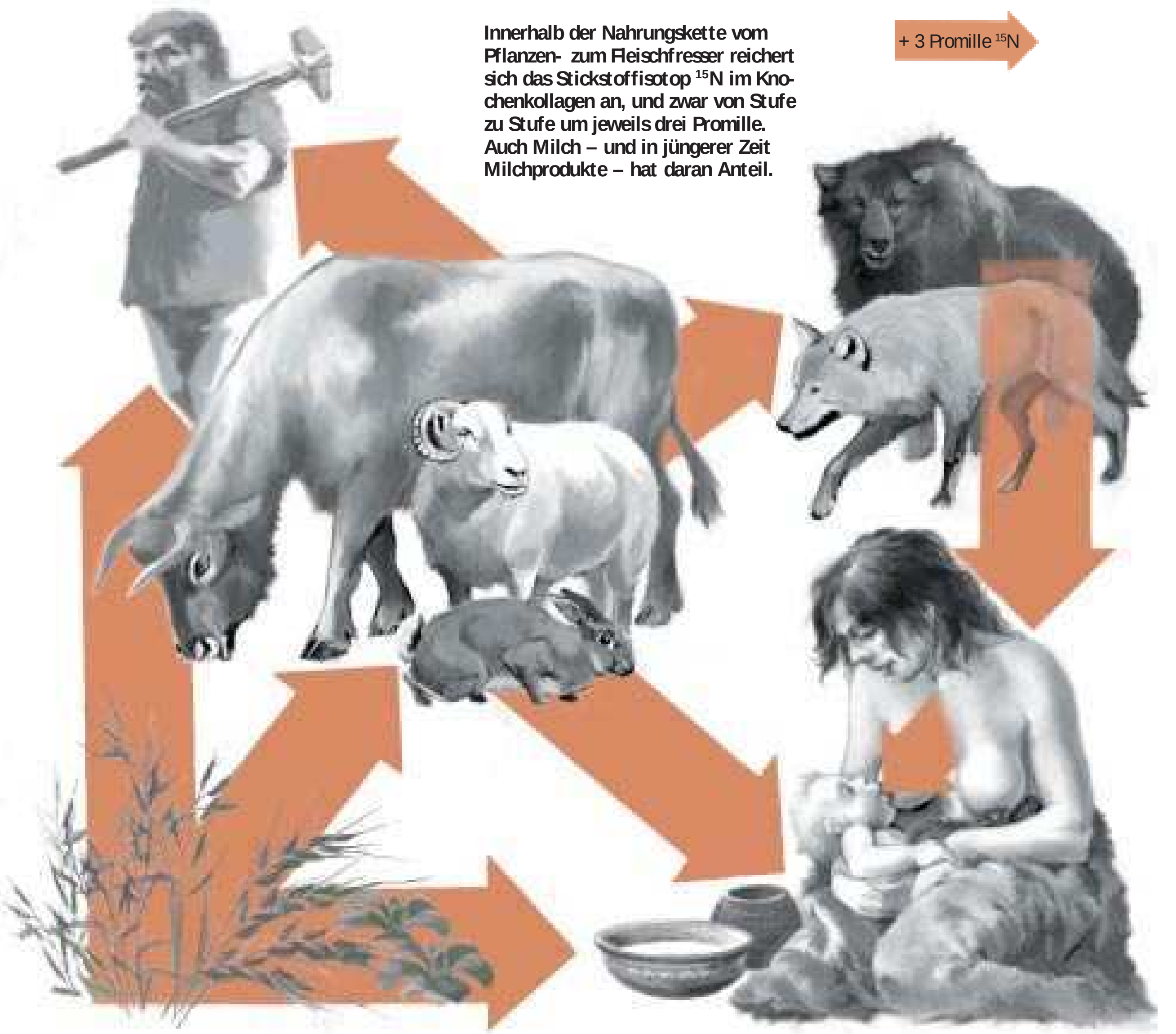
reichern sich vom Pflanzen- zum Fleischfresser schwere Isotope in den Eiweißmolekülen an. Vor allem Stickstoff im Knochenkollagen erweist sich als wichtige Informationsquelle.

Denn das schwerere ^{15}N akkumuliert im Nahrungsnetz von Stufe zu Stufe um drei Promille, sodass es beispielsweise beim Fleischfresser um diesen Wert häufiger vorkommt als bei seiner Beute. Das ermöglicht uns zum Beispiel, für frühe menschliche Bevölkerungen den Anteil von Fleisch an seiner Nahrung zu bestimmen. Das ist eine sehr wesentliche Angabe. Denn immer wieder hat die Suche nach ausreichender Nahrung Geschichte geschrieben. Man denke nur an die Folgen des Ackerbaus, der Sesshaftigkeit und damit letztlich das Entstehen von Städten förderte. Auch die Erschließung des Meeres als Nahrungsressource spiegelt sich im Verhältnis der Isotope (fachlich „Isotopien") wieder, da auf Grund der speziellen Verhältnisse in den Ozeanen Fische und Meeressäugetiere signifikant höhere Stickstoff-Isotopien aufweisen als Landtiere.

Wir haben Kollagen aus Schädelknochen von 33 Personen untersucht, die um 5500 vor Christus, also in der Mittelsteinzeit (Mesolithikum), in den Ofnethöhlen im Nördlinger Ries bestattet und dort zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckt worden waren. Alle zeigten Spuren von Gewalt. Wurde eine ganze Gruppe von Männern, Frauen und Kindern jäh aus dem Leben gerissen? Unter dieser Annahme liefern die Schädelknochen eine Momentaufnahme der damaligen Lebensweise. Der Vergleich der Isotopen-Verhältnisse mit denen etwa von Wölfen zeigt eindeutig, dass die Menschen der Ofnethöhle zur Kategorie „Fleischfresser" gehörten. Offensichtlich waren sie erfolgreiche Jäger und lebten in wildreichem Gebiet. Eine vergleichbare Untersuchung durch den Anthropologen Michael P. Richards von der Universität Oxford warf vor kurzem ein neues Licht auf die Neandertaler: In der Nähe von Zagreb gefundene Skelettreste stammen von einem fast reinen Fleischfresser, also ebenfalls einem erfolgreichen Jäger.

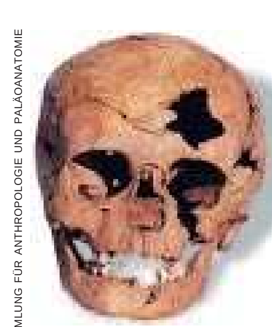
Einige Werte übertrafen sogar die von Fleischfressern, und zwar die der maximal 2,5 Jahre alten Kleinkinder. Die einfache Erklärung lautet: Milch. Sie weist eine besonders hohe Isotopie auf, denn bei ihrer Bildung wird Nahrungseiweiß erneut umgesetzt, und der schwerere Stickstoff kann sich weiter anreichern. In der Mittelsteinzeit gab es jedoch noch

Stickstoff-Isotope in der Nahrungskette



Innerhalb der Nahrungskette vom Pflanzen- zum Fleischfresser reichert sich das Stickstoffisotop ^{15}N im Knochenkollagen an, und zwar von Stufe zu Stufe um jeweils drei Promille. Auch Milch – und in jüngerer Zeit Milchprodukte – hat daran Anteil.

STAATSSAMMLUNG FÜR ANTHROPOLOGIE UND PALÄOANATOMIE







Kopfbestattungen waren in der mittleren Steinzeit üblich (hier drei Schädel aus der Ofnet-Höhle).

keine zu melkenden Haustiere. Demnach wurden die Kinder aus der Höhle mindestens bis zu ihrem vollendeten zweiten Lebensjahr gestillt.

Dieser Befund überrascht uns moderne Menschen, doch dürften so lange Stillzeiten in historischen und prähistorischen Epochen die Regel gewesen sein. Auch bei anderen Untersuchungen an den Skelettresten früh verstorbener Kinder hält nämlich die hohe Stickstoff-Isotopie vom frühen Säuglingsalter bis zum vollendeten zweiten oder dritten Lebensjahr an und sinkt dann um drei Promille auf das „Normalmaß“ der jeweiligen Bevölkerung. Dieses Absinken fällt allerdings unterschiedlich steil aus, vermutlich je nachdem, ab wann und in welchem Maße feste Nahrung zugefüttert wurde. Danach sind die Kinder voll abgestillt und erhalten eine den Erwachsenen vergleichbare Kost. Diese langen Stillzeiten haben gute Gründe. Für das Kind bedeuten sie eine verlängerte Phase der passiven Immunisierung durch die Muttermilch, für die stillenden Frauen zumindest auf statistischer Ebene einen Schutz vor einer frühen erneuten Schwangerschaft.

Obgleich Kollagen durch das Knochenmineral gut maskiert und geschützt ist, wird es während der langen Liegezeiten im Erdreich unweigerlich zerfallen, Ergebnis insbesondere des Stoffwechsels Boden bewohnender Mikroorganismen. Simulationsexperimente haben gezeigt, dass solcher Art degradiertes Knochenkollagen völlig andere Isotopien aufweisen kann. Den Erhaltungszustand des Kollagens im archäologischen Skelettfund zu erheben, ist deshalb zentral für die geschilderte Analyse.

Zahlreiche Parameter, wie die Zusammensetzung der Aminosäuren oder das Verhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff darin gestatten dies zuverlässig: Bei gut erhaltenem Kollagen liegt es zwischen 2,9 und 3,6; bei stark abgebautem überwiegt der Kohlenstoff meist noch stärker. Darüber hinaus lohnt eine Analyse der Aminosäure-Zusammensetzung ohnehin, lässt sie doch Rückschlüsse auf Erkrankungsformen wie den Vitamin C-Mangel zu – er verursacht ein Defektkollagen mit abweichender Aminosäurekomposition.

Skelettfunde von Menschen aus historischer und prähistorischer Zeit entpuppen sich somit als „Gewebebanken“, deren Untersuchung mittels moderner archäometrischer Methoden ganz wesentliche Determinanten der menschlichen Bevölkerungsentwicklung liefert. Die Implikationen für die Alltagsgeschichte sind weit reichend. Aus der Rekonstruktion der Nahrung folgt die der Wirtschaftsweise: Betrieben unsere Vorfahren Fischfang, Ackerbau oder Viehzucht? Entsprechend stark müssen sie in die Landschaft eingegriffen haben.

Das Maß der Säuglingspflege berührt die Ebene von Sozialverhalten und Fortpflanzungsstrategien. Untersucht man überdies Skelettfunde von Wirbeltieren, vermittelt die Isotopen-Methode Einblicke in vergangene Ökosysteme. So hilft ein Knochenprotein zu erklären, wie sich die Welt entwickelt und wie sie der Mensch verändert hat. ■

Mobilität in der Antike

Strontium-Isotope unterscheiden Zuwanderer und Einheimische

Wer einen sicheren Arbeitsplatz wollte, musste auch in der Antike mitunter seine Heimat verlassen. Als die Römer im Verlauf des ersten Jahrhunderts nach Christus im südlichen Donauraum die Provinz Raetium errichteten, akquirierten sie den archäologischen Befunden zufolge germanische Söldner zur Verteidigung des Grenzwalles Limes. Dies ergaben unsere Untersuchungen an siebzig Skeletten aus dem Kastellfriedhof von Neuburg an der Donau, der von etwa 330 bis 400 nach Christus genutzt worden war. Um ihre Herkunft zu bestimmen, erhoben wir die Relation der Strontium-Isotope mit den Massenzahlen 86 und 87 in Knochen und Zahnschmelz.

Strontium ist ein Spurenelement, das im Wesentlichen aus Nahrung und Trinkwasser stammt, in die genannten Hartgewebe eingebaut wird und noch nach dem Tode die jeweiligen geochemischen Gegebenheiten vor Ort charakterisiert. Weil Zahnschmelz nur in der Kindheit aufgebaut wird, Knochengewebe hingegen während des ganzen Lebens, weisen signifikante Unterschiede der Relationen beider Gewebe darauf hin, ob jener Mensch nicht an seinem Geburtsort verstarb.

Im Jahre 488 nach Christus verließen die Römer Raetium und im Jahre 551 wird in Schriften ein Volksstamm der Bajuwaren für diese Region erwähnt. Ihre Herkunft ist ungewiss, doch gehen die Archäologen davon aus, dass es Abkömmlinge von germanischen Söldnern waren. Raetium, ein Schmelztiegel germanischer Stämme?

Tatsächlich belegen die Strontium-Verhältnisse der Neuburger Skelette, dass in der fraglichen Zeit gut ein Drittel der erwachsenen Männer und zwei Drittel aller erwachsenen Frauen nicht von dort stammt, sondern aus dem Gebiet des heutigen Böhmen. Das Verfahren lässt sogar eine noch feinere Aussage zu: Zähne, deren Schmelz erst im späten Kindesalter aufgebaut wurde, stimmen in ihrer Isotopie wieder mit den Knochenbefunden, also den Strontium-Verhältnissen der Region überein. Diese Einwanderer müssen also schon in ihrer frühen Kindheit eingereist sein; sie wurden keinesfalls erst als Söldner angeworben.

Literaturhinweise

Analytisch-chemische Methoden in der prähistorischen Anthropologie: Spurenelemente und stabile Isotope. Von Gisela Grupe in: R. Knußmann (Hg.): Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen. Band I, 2. Teil: Physiologische, psychologische, genetische und mathematische Methoden. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York 1992. S. 66.



Gisela Grupe *studierte Biologie an der Universität Göttingen, wo sie später in Anthropologie promovierte und habilitierte. Seit 1991 ist sie Professorin für Anthropologie und Umweltgeschichte an der Ludwig-Maximilians-Universität München und Direktorin der dortigen anthropologischen Staatssammlung.*

INTERVIEW

„Archäometrie ist eine Querschnittswissenschaft“

Interview mit Professor Günther Wagner, dem Leiter der Forschungsstelle Archäometrie der Heidelberger Akademie der Wissenschaften und Vorsitzenden der Gesellschaft für Naturwissenschaftliche Archäologie ARCHAEOMETRIE.



Geologe Günther Wagner kooperiert mit Archäologen.

Spektrum: *Sie sind Mitbegründer einer Gesellschaft mit kompliziertem Namen – warum heißt sie nicht einfach Gesellschaft für Archäometrie?*

Professor Wagner: Weil sich damit nicht jeder identifizieren würde, den es angeht. Die Bezeichnung *archaeometry* prägten Kollegen an der Universität Oxford in den sechziger Jahren. Sie starteten unter diesem Titel eine Zeitschrift, die erstmals archäologische Forschung mit naturwissenschaftlichen Methoden zum Thema hatte – unsere Gesellschaft ist inzwischen Mitherausgeber. Einige Disziplinen wie insbesondere die Biowissenschaften kamen darin aber kaum vor. Deshalb legten wir den Namen vor zwei Jahren breit an. Ich bin aber überzeugt, dass die Bezeichnung „Archäometrie“ gebräuchlich wird. Es ist der richtige Name für eine Querschnittswissenschaft, die sich durch alle naturwissenschaftlichen bis in die kulturhistorischen Fächer erstreckt.

Spektrum: *Warum ist solch eine wissenschaftliche Gesellschaft überhaupt von Belang? Es ging doch vorher ohne.*

Wagner: Weil wir ein gemeinsames Forum mit den Archäologen brauchen. Die Archäometrie – ich möchte der Einfachheit halber bei diesem Namen bleiben – gibt es in Deutschland zwar schon seit den 70er Jahren. Doch sie war mehr oder weniger eine Privatveranstaltung für Chemiker und für Physiker, die aber weitgehend ohne die Archäologen stattfand. Mittlerweile hat es sich herumgesprochen, dass Naturwissenschaftler aus ihren Fundstücken neue Informationen herausholen können. Doch woher sollen sie wissen, wer was mit welcher Methode untersuchen kann? Jetzt haben sie eine Anlaufstelle, die sie berät.

Spektrum: *Vom Hobby zur Profession, von der Profession zum Professor? Wird es bald Lehrstühle für Archäometrie geben oder geht die Liebe nicht so weit?*

Wagner: Im Gegenteil, der erste wurde hier zu Lande bereits an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg eingerichtet, an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt entsteht gerade ein Nebenfachstudiengang und andere Hochschulen planen Ähnliches. Das geschieht allerdings vor dem Hintergrund einer Bündelung der Lehre. Angesichts sinkender Studentenzahlen fallen einige Professuren dem Rotstift zum Opfer, dafür könnten an ausgewählten Universitäten regelrechte Kompetenzzentren in den Geo- und Altertumswissenschaften entstehen. Unsere Gesellschaft möchte bei dieser Veränderung der Hochschullandschaft das Anliegen der Archäometrie einbringen.

Spektrum: *Zu diesen Interessen zählt vermutlich auch der Zugang zu Fördermitteln?*

Wagner: Natürlich, und dazu ist eine wissenschaftliche Gesellschaft sogar von entscheidender Bedeutung. Stellen Sie doch einmal als Biologe einen Antrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, diese möge ein Projekt fördern, das die Ernährungsgewohnheiten einer prähistorischen Bevölkerungsgruppe untersucht. Welches Referat der DFG ist zuständig? Das für Biologie? Das für Archäologie? Wer soll das Gutachten stellen? Sie haben schlechte Karten, denn in den Einzeldisziplinen gibt es viele dringliche Forschungsvorhaben. Eine neue wissenschaftliche Gesellschaft ist aber ein Indiz für eine veränderte Forschungslandschaft, auf die eine Stiftung dann durch Änderung ihrer Struktur reagiert. Und schon sind die Karten neu gemischt!

Spektrum: *Wie ist denn die Akzeptanz der neuen Adresse auf Seiten der Archäologie?*

Wagner: Etwa ein Drittel unserer Mitglieder sind Archäologen, das spricht für sich. Es hat natürlich ein bisschen gedauert, aber inzwischen haben viele die Chance erkannt, ihre Forschung durch weitere Daten zu ergänzen.

Spektrum: *Und die Verständigung klappt so ohne weiteres? Tut sich da nicht manchmal der Graben zwischen Geistes- und Naturwissenschaften auf?*

Wagner: Gelegentlich, vor allem im Kontakt mit der Klassischen Archäologie, die stark kunstgeschichtlich orien- ▶



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Archäometrie untersucht auch die steinzeitliche Ernährung – hier eine eher unwahrscheinliche Alternative.

tiert ist. Da sind die Methoden und Denkweisen doch oft sehr verschieden, aber das ändert sich mit jeder neuen Studentengeneration. Dagegen hat die prähistorische Archäologie historische Wurzeln in der Geologie und ist somit Kultur-, aber auch Naturwissenschaft.

Spektrum: *Also nur eitel Freude unter dem neuen Dach?*

Wagner: Meistens jedenfalls. Schwierig wird es dann, wenn man uns ruft, um eine Theorie durch Fakten zu untermauern und wir liefern das Gegenteil. Sie müssen verstehen, ein Archäologe ähnelt einem Detektiv, der ja auch immer erst nach der Tat am Tatort erscheint. Zeugenberichte gibt es erst ab der Erfindung der Schrift, davor nur stumme Informationsquellen wie Tonscherben, Knochen, Erdschichten und dergleichen. Also wird ein Indizienbeweis geführt, der zeigen soll, dass eine bestimmte Vermutung über den Tathergang sehr wahrscheinlich ist. Doch manchmal sagen die Ergebnisse des kriminalistischen Labors das Gegenteil. Und das tut dann oft weh.

Spektrum: *Schon erlebt?*

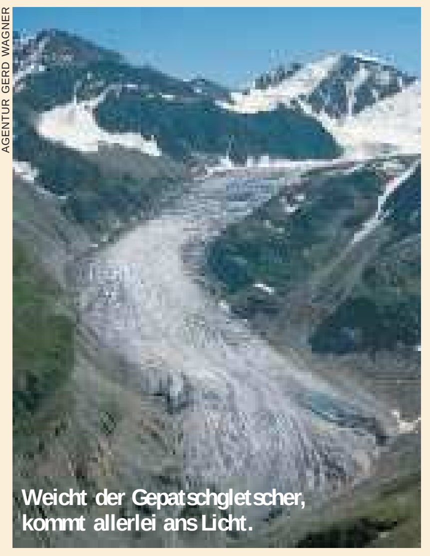
Wagner: Es gab einen heftigen Disput, als wir auf Einladung eines serbischen Archäologen die chemische Zusammensetzung und die Isotopenverhältnisse der frühesten südosteuropäischen Kupferobjekte mit Erzen aus einer bestimmten prähistorischen Mine nahe dem Eisernen Tor verglichen. Wir sprechen hier vom Chalkolithikum im 5. und 4. Jahrtausend vor Christus, und die Theorie war: Dies ist die Mine, aus deren Erz das Kupfer stammt, und damit ist sie das älteste bekannte Kupferbergwerk in Europa. Unsere Resultate zeigten klar das Gegenteil – keines der vielen analysierten Artefakte enthielt Metall aus dieser Mine. Das hörte der Kollege nicht gern. Aber das sind Einzelfälle. Fest steht: Archäometrie und Archäologie haben ein gemeinsames Ziel und einander ergänzende Methoden. Für die nächste oder übernächste Generation von Archäologen wird das selbstverständlich sein. ■

Interview:
Klaus-Dieter Linsmeier, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

TECHNOGRAMM

KLIMAFORSCHUNG

Vom Eise befreit …


AGENTUR GERD WAGNER

Weicht der Gepatschgletscher, kommt allerlei ans Licht.

Mit dem Zurückweichen der Gletscher geraten immer wieder Stämme ans Licht, die vor Tausenden von Jahren in vormals eisfreiem Gebiet wuchsen. So fand man im Kaunertal vor dem Gepatschgletscher fünfzig Stammreste, die etwa 8500 Jahre Geschichte abdecken; Funde im Großglocknergebiet erweiterten die Chronologie sogar bis 10500 Jahre. Aus ihren Daten schließen Klimaforscher der Universität Innsbruck, dass die Temperaturen im Alpenraum über nahezu zwei Drittel der zehn Jahrtausende den heutigen vergleichbar waren oder sogar darüber lagen. Dies entspräche auch weitgehend den Auswertungen von grönländischen Eisbohrkernen. Eine langdauernde Erwärmung kann also durchaus natürliche Ursachen haben. Einen Einfluss des Menschen auf die jüngste Entwicklung schließen die Forscher aber keineswegs aus: In den letzten 1000 Jahren verzeichnete ihre Chronologie keinen derartigen Aufwärtstrend wie im 20. Jahrhundert.

ANCIENT DNA

Viele Mütter hat das Pferd

Gemeinhin wird die Domestikation des Pferdes den Mongolen zugeschrieben. Auf ihren Eroberungszügen durch Europa und Asien hätten sie das Haustier verbreitet. Ein Vergleich von DNA in den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zellen, lassen daran Zweifel aufkommen (*Science*, 19. Januar 2001). Diese Erbsubstanz wird nur von der Mutter an ihre Nachkommen weitergegeben und sollte sich bei Abstammung von einer kleinen Gruppe von Vorfahren sehr ähneln. Carles Vilà und Hans Ellgren von der Universität Uppsala untersuchten DNA-Proben von 191 reinrassigen Pferden, darunter auch vom Przewalski-Pferd, einer Schwesterart der Wildpferde. Sie verglichen die Daten mit 12000 Jahre alten aDNA-Proben aus der Permafrostregion Alaskas und bis zu 2000 Jahre alten aus archäologischen Fundstätten in Estland und Schweden. Genetisch waren diese alten DNA-Sequenzen so variabel wie die heutiger Tiere. Das Pferd als Haustier hat viele Vorfahren, ist also an mehreren Orten entstanden.


SAVE-BILD

DNA vom Przewalski-Pferd kam in den Datenpool.

NAHRUNGSANALYSE

War „Ötzi“ Vegetarier wider Willen?


DPA

Was aß der Mann vom Hauslabjoch?

Wohl keine Leiche hat so viel Aufsehen erregt, wie die eines vermutlich 40 bis 53 Jahre alten Mannes, der vor rund 5300 Jahren am Hauslabjoch in den Ötztaler Alpen starb. Vieles hat „Ötzis“ Leiche mittlerweile den Wissenschaftlern über das Leben jener Zeit verraten, denn Haut, Haare, Kleidung und Tätowierungen waren in einmalig gutem Zustand erhalten. Leider enthielt der Magen kaum Nahrungsreste, die letzte Mahlzeit war wohl schon etliche Stunden her gewesen. Stephen Macko von der Universität Virginia schloss aus den Isotopen-Verhältnissen von Stickstoff und Kohlenstoff im Haar auf eine vegetarische Lebensweise (*The FASEB Journal, März 1999*). An der Universität Glasgow haben James Dickson und seine Kollegen jedoch im Dickdarm des Gletschermannes neben Getreide, Moos, Pollen und Wurmeiern auch verdaute Muskelfasern gefunden (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Dezember 2000*). Eine Lösung dieses Widerspruchs bietet nun der Anthropologe Stanley Ambrose von der Universität Illinois: Während die Haaranalyse etwas über die Nahrung des vergangenen Monats verrät, geben Spuren im Verdauungstrakt die Speisekarte der letzten Mahlzeiten wieder. Falls der Gletschermann wenig Fleisch aß, dann vermutlich nicht aus Überzeugung, sondern mangels Möglichkeit.

Archäozoologie

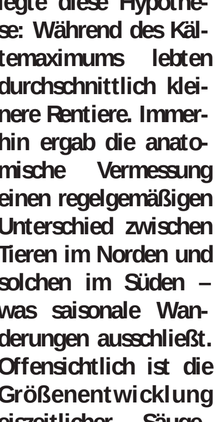
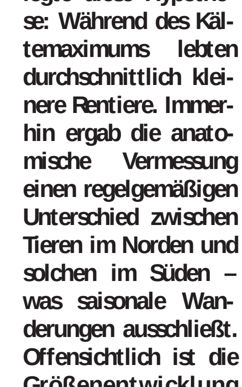
Klimafühlige Knochen

Isotopenverhältnisse in Knochen und Zähnen von Tieren erlauben Rückschlüsse auf die Umgebungstemperaturen prähistorischer Zeiten.

Wer Gras frisst, braucht lange Zähne, denn der Verschleiß ist erheblich. So werden die Backenkronen von Pferden oft mehr als zehn Zentimeter hoch. Der größte Teil steckt im Kiefer und wird nach und nach herausgeschoben, um den Verbrauch an Kaufläche auszugleichen. Ein solcher Zahn benötigt mehr als ein Jahr für sein Wachstum. In dieser Zeit ist er der chemischen Zusammensetzung seiner jeweiligen Umgebung ausgesetzt. Archäozoologen untersuchen deshalb Isotopenverhältnisse im Schmelz, um beispielsweise Wanderungsbewegungen von Tierherden nachzuvollziehen.

Selbst Rückschlüsse auf die während des Zahnwachstums herrschende Temperatur lassen sich ermitteln. Denn mit dem Trinkwasser hatte das Pferd die Sauerstoff-Isotope ^{18}O und ^{16}O aufgenommen. Vereinfacht gesagt verdunstet bei Kühle weniger Wasser mit dem schwereren Isotop. Es reichert sich deshalb im Meer an, während der Regen über dem Festland weniger davon enthält. Änderungen im Verhältnis von ^{18}O zu ^{16}O charakterisieren deshalb globale Warm- und Kaltzeiten. Weil Pferdezähne kontinuierlich von der Krone her wachsen und Jungtiere noch keine Wurzel bilden, lässt sich sogar noch feiner differenzieren. Beispielsweise enthält der untere Schmelzrand eines Jungtieres chemische Verbindungen und Elemente, die es kurz vor seinem Tode aus der Umgebung aufgenommen hatte. Auf diese Weise vermag der Archäozoologe sogar Sommer- und Winterniederschläge zu unterscheiden. Das Gebiss eines jungen Maultiers, das am vermutlichen Kampfplatz der Varus-Schlacht gefunden wurde (Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 76), half beispielsweise, die Auseinandersetzung auf den Spätsommer des Jahres 9 nach Christus zu datieren.



SAVE-BILD

Knochen enthüllen: Auch kleine Rentiere trotzten der Eiszeit.

Anhand der Sauerstoff-Isotopien im Knochen untersuchten wir den Einfluss des Klimas auf die Größe eiszeitlicher Tiere. Die so genannte Bergmannsche Regel besagt nämlich, dass sich warmblütige Tiere derselben Art unter kälteren Bedingungen größer entwickeln sollten, da sie dann im Verhältnis zu ihrer Masse eine kleinere Wärme abstrahlende Oberfläche aufweisen. Die Isotopen-Analyse von Rentierknochen der vorletzten und der letzten Eiszeit widerlegte diese Hypothese: Während des Kältemaximums lebten durchschnittlich kleinere Rentiere. Immerhin ergab die anatomische Vermessung einen regelgemäßigen Unterschied zwischen Tieren im Norden und solchen im Süden – was saisonale Wanderungen ausschließt. Offensichtlich ist die Größenentwicklung eiszeitlicher Säugetiere eine komplexe Angelegenheit.

Voruntersuchungen lassen hoffen, dass Knochen und Zähne zudem eine gute Quelle für aDNA genannte Fragmente von Erbsubstanz bieten. Weil sie in Nahrungsabfällen häufig und in großer Menge vorkommen, sollten die entsprechenden Aufbereitungs- und Analysemethoden zielstrebig entwickelt werden, um mehr über frühe Haustiere und damit auch mehr über unsere Ahnen zu erfahren.

Hans-Peter Uerpmann

Der Autor lehrt Archäozoologie an der Universität Tübingen.

Gene und Verhalten

Die Entzifferung des menschlichen Genoms regt die Fantasie an: Hängt auch unser Handeln primär von den Genen ab? Was treibt den Menschen an? Mit Spektrum diskutierten der Soziobiologe Eckart Voland und der Kulturpsychologe Lutz H. Eckensberger.

Was bewegt den Menschen?

Spektrum: *Herr Professor Voland – sind wir nur genetisch determinierte Bioautomaten?*

Prof. Dr. Eckart Voland: Als Biologe gehe ich in der Tat davon aus, dass alle Information zum Aufbau des Menschen und zu seiner Steuerung in den Genen steckt. Eine andere Informationsquelle gibt es nicht. Meine Wissenschaft, die Soziobiologie, liefert ja gerade eine genetische Theorie des Verhaltens. Es wäre jedoch falsch zu behaupten, die Identifikation der Gene brächte uns eins zu eins auch ein Muster der verschiedenen menschlichen Verhaltensweisen, Strategien und Präferenzen.

Spektrum: *Was leisten die Gene?*

Voland: Sie codieren Proteine, nichts weiter. Aber damit bauen sie letztlich das auf, was auch unser Verhalten steuert: die Psyche mit all ihren Kompetenzen, Mechanismen und Modulen. Ausschlaggebend für unser konkretes Verhalten ist natürlich auch unser Umfeld. Die Gene liefern sozusagen die Matrix zum Verständnis der Funktion des Verhaltens. Aber die Analyse des menschlichen Genoms wird nicht ausreichen, um unser Verhalten komplett zu verstehen.

Spektrum: *Herr Professor Eckensberger – Sie sind Psychologe. Wo suchen Sie die Ursachen für unser Verhalten?*

Prof. Dr. Lutz H. Eckensberger: Mir persönlich geht es weniger um das konkrete Verhalten in dieser oder jener Lage, sondern um die Rekonstruktion der normativen Bezugssysteme, die unser Verhalten im Ganzen ordnen. Wie kommt der Mensch dazu, Standards, die sein Verhalten regulieren, zu entwickeln? Dazu gehören die Moral, das Recht und die Konventionen – aber ebenso die Logik.

Spektrum: *Und für Sie spielt das alles keine Rolle, Herr Voland?*

Voland: Doch, natürlich, aber unter einem anderen Gesichtspunkt. Ich begreife unser Verhalten als das Ergebnis eines „adaptierten Phänotyps“, wie wir Biologen sagen.

Spektrum: *Was heißt das?*

Voland: Der heutige Mensch ist ein angepasster Organismus. Er ist aus Genen konstruiert – und zwar aus solchen, die sich innerhalb der Evolution als vorteilhaft erwiesen haben. Unsere verhaltenssteuernde Maschinerie – mit all ihren Modulen, Motiven und Kognitionen, mit all dem, was wir tagtäglich auch in unserer Selbstwahrnehmung erleben – ist das Produkt der „egoistischen Gene“, verstanden als Ergebnis eines Selektionsprozesses, der in der Vergangenheit nur solches Verhalten belohnt hat, das der Fortpflanzung, also der Weitergabe der eigenen Gene, dienlich war.

Spektrum: *Können Sie das an einem Beispiel verdeutlichen?*

Voland: Nehmen Sie irgendein typisches Verhaltensmuster – meinetwegen „Verwandte helfen Verwandten“! Ich frage: Wo hat dieses Verhaltensmuster dem Menschen in der Vergangenheit einen Überlebensvorteil für die eigenen Gene beschert, sodass es bis heute weitergegeben wurde?

Eckensberger: In der Tat gibt es viele Belege dafür, dass man Verwandten, aber auch Freunden eher hilft als Fremden. Ich interpretiere das jedoch im Kontext der genannten Bezugssysteme, etwa unter der Berücksichtigung ethischer Überzeugungen.

Spektrum: *Die Gene spielen in Ihren Untersuchungen also keine Rolle.*

Eckensberger: Keine große jedenfalls.

Spektrum: *Was können Sie als Kulturpsychologe von der Soziobiologie lernen?*

Eckensberger: Was ich an der Soziobiologie interessant finde, ist, dass sie die wichtige Frage nach dem Warum stellt:

FOTOS: CHRISTOPH PÖPPE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Eckart Voland (3.v.r.) und Lutz H. Eckensberger (2.v.r.) zusammen mit Adelheid Stahnke, Reinhard Breuer und Carsten Könneker von Spektrum der Wissenschaft.

Warum sind bestimmte Verhaltensstrukturen überhaupt da? Das ist ja eine völlig alternative Sicht auf die ganze Anlage-Umwelt-Debatte, die in der Psychologie bestenfalls nach dem Wie fragt, nach der Art und Weise des Handelns.

Spektrum: *Kann die Entdeckung der einzelnen Gene im menschlichen Genom, wie sie derzeit erfolgt, unsere Erforschung des kulturellen menschlichen Verhaltens weiterbringen?*

Eckensberger: Kaum. Das menschliche Genom hat sich in den letzten zehntausend Jahren ja so gut wie nicht mehr verändert. Auf der anderen Seite hat sich die menschliche Gesellschaft, die unsere Verhaltensweisen mit hervorbringt, ganz erheblich entwickelt. Dafür können die konstant gebliebenen Gene also wohl kaum als direkte und einzige Ursache in Frage kommen!

VOLAND: „Unsere verhaltenssteuernde Maschinerie ist das Produkt der egoistischen Gene."

Spektrum: *Ist die Psychologie überhaupt an den biologisch-genetischen Bedingtheiten interessiert, oder sind das nur Randbedingungen, die irgendwo fern am Horizont liegen?*

Eckensberger: Für mich sind sowohl die organischen Voraussetzungen, die wir heute beim Menschen vorfinden, – also zum Beispiel seine Hirnstruktur – als auch deren entwicklungsgeschichtliche Rekonstruktion durch die Soziobiologie eine Folie, die ich sehr wohl zur Kenntnis nehmen muss. Nur: Menschliches Verhalten erklären sie mir noch lange nicht. Es handelt sich dabei allein um Ermöglichungsbedingungen für psychologische Strukturen und Funktionen.

Voland: Das sehe ich anders. Alle Verhaltensweisen waren zum Zeitpunkt ihrer Entstehung innerhalb der Geschichte des Menschen in irgendeiner Form biologisch förderlich. Sie haben alle das „Survival of the fittest" bestanden.

Was immer die Psychologie untersucht – sie sollte sich die Frage stellen, zu welchem Zweck ein bestimmtes Verhaltensschema evolviert ist. Und dann, Herr Eckensberger, haben Sie ein ganz bestimmtes Suchbild in Ihrem Forschungsprogramm, das Ihnen fehlen würde, wenn Sie sich mit der Formel von den „Ermöglichungsbedingungen" zufrieden geben.

Eckensberger: Natürlich brauche ich ein Suchbild, eine Theorie. Aber muss



Eckart Voland (links) ist Soziobiologe an der Universität Gießen. Lutz H. Eckensberger lehrt Psychologie an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt a. M. und ist Direktor des Deutschen Instituts für Internationale Pädagogische Forschung.

das unbedingt die Soziobiologie sein? Ich verstehe Ihre Argumentation sehr wohl. Sie interpretieren alles, was den Menschen ausmacht, unter dem Gesichtspunkt der Angepasstheit im Sinne der Evolutionstheorie: Wie könnte dieses oder jenes Verhaltensmuster in der Vergangenheit des Menschen der Weitergabe der eigenen Gene gedient haben? Das ist zunächst einmal eine spannende Frage. Das Problem besteht nur darin, dass Sie aus den möglichen Antworten auf Ihre zielorientierte Frage am Ende eine kausale Aussage basteln und behaupten, die egoistischen Gene hätten das untersuchte Verhaltensmuster sozusagen aktiv und vor allem kausal hervorgebracht. Diesen Sprung halte ich für logisch heikel: Darf man wirklich behaupten, nur weil etwas eine bestimmte Funktion hat, ist es auch so verursacht?

Spektrum: *Können Sie Ihren Vorwurf noch ein wenig präzisieren?*

Eckensberger: Jede beliebige Verhaltensweise, die mit der soziobiologischen Brille betrachtet wird, kann überflüssig werden und dennoch da sein. Umgekehrt kann Neues entstehen, das früher keine Funktion hatte. Beispielsweise kann eine bestimmte Präferenz der Männer – oder auch der Frauen – bei der Partnerwahl ihre ursprüngliche Funktion verlieren, wenn der kulturelle Kontext sich ändert. Und trotzdem wird sie von der Soziobiologie immer noch kausal interpretiert.

Voland: Aber es leugnet ja niemand, dass es historische und kulturelle Brüche gibt. Nehmen Sie das Beispiel männliche Eifersucht! Diese entstand einmal aus einer Situation heraus, wo Männer ein evolviertes Interesse daran hatten, Ihre Vaterschaft zu sichern. Ihre Eifersucht half ihnen, die eigenen Gene durchzubringen. Heute, in Zeiten fast perfekter Verhütung, fehlt der Eifersucht dieser Grund ihrer evolutionären Entstehung: Die Frauen brauchen ja nicht mehr schwanger zu werden, wenn sie es nicht wollen. Und trotzdem können sich Männer nicht von ihrer Emotionalität befreien; sie ist stammesgeschichtlich gewachsen. Insofern berührt mich Ihr Einwand mit den kulturellen Brüchen wenig.

Spektrum: *Wie stehen Sie sonst zu der Position von Herrn Eckensberger?*

Voland: Ich werfe den nicht evolutionär inspirierten Psychologen eine gewisse Kurzsichtigkeit vor: Sie legen ihre kulturvergleichenden Studien kaleidoskopartig an und staunen dann über die ungeheure Vielfalt dessen, was sie in den unterschiedlichen Gesellschaften so alles finden. Aber sie versäumen es, ein einheitliches Prinzip dahinter zu suchen.

Spektrum: *Sie meinen das Prinzip, sich immer so zu verhalten, wie es für die Weitergabe der eigenen Gene förderlich ist.*

Voland: Genau. Denken Sie etwa an die Vaterrolle! Wie nehmen Männer ihre Vaterrolle ein? Wir kennen Gesellschaften, wo die Männer ungeheuren Wert darauf legen, dass die Kinder ihrer Frauen immer auch ihre eigenen Kinder sind. Da

ECKENSBERGER: „Menschliches Verhalten hat keine Ursachen, sondern Gründe."

gibt es dann meist ein ausgefeiltes System von Kontrollmechanismen. Andererseits kennen wir aber auch sexuell sehr liberale Gesellschaften. Auf den ersten Blick könnte man bezweifeln, dass in Bezug auf die Vaterrolle in diesen sehr verschiedenen Gesellschaftstypen eine Verbindung besteht. Die Unterschiede scheinen schlicht zufällig und nicht von den Genen her bedingt.

Spektrum: *Und das ist nicht so?*

Voland: Fragen Sie einmal nach den strategischen Möglichkeiten, die die Männer jeweils haben, um ihre gen-egoistischen Interessen durchzusetzen! ▶



VOLAND:
„Wäre das Maß für die Güte einer Theorie ihre subjektive Verdaulichkeit, hätte die Wissenschaft nie das geozentrische Weltbild überwunden."

Manchmal gelingt das eben in einer sexuell freizügigen Gesellschaft besser – mit der Konsequenz natürlich, dass ein Mann seine Vaterrolle dort auch nicht annimmt. Was er an materiellen Dingen zu vererben hat, vererbt er dann nicht den Kindern seiner Frau – das sind vielleicht nicht seine eigenen –, sondern den Kindern seiner Schwester, denn mit denen ist er ja in jedem Fall verwandt. Dieses Verhalten rechnet sich am Ende; das lässt sich spieltheoretisch zeigen. – Sie sehen also: Kulturelle Vielfalt ist in diesem Fall durch ein einheitliches soziobiologisches Prinzip erklärbar.

Eckensberger: Ich finde Ihr Beispiel aus zwei Gründen interessant: Zum einen zeigt es, dass das leitende soziobiologische Erklärungsprinzip so allgemein ist, dass man fast immer irgendeine Fitness steigernde Funktion für ein bestimmtes Verhalten konstruieren kann. Daraus ergibt sich ein erstes grundsätzliches Problem: Kann man Ihre Theorie überhaupt falsifizieren? Zweitens belegt das Beispiel, dass sämtliche Verhaltensweisen, die noch einen nahen Bezug zum Akt der Fortpflanzung haben, soziobiologisch wahrscheinlich immer irgendwie plausibel zu machen sind. Es gibt aber ganz andere Bereiche – Berufswahl meinetwegen oder künstlerisches Schaffen –, die den Menschen ebenfalls auszeichnen, wo man jedoch weit größere Schwierigkeiten hat, die Existenz allein auf die „egoistischen Gene" zurückzuführen.

Spektrum: *Warum gibt es Komponisten und Maler, Herr Voland?*

Voland: Hier konkurrieren noch verschiedene Hypothesen miteinander. Eine besagt etwa, dass künstlerische Kreativität im Zusammenhang mit männlichen Selbstdarstellungstendenzen im Werbeverhalten entstanden ist. Ich gestehe jedoch ein, dass diese Erklärung nicht unbedingt zutreffen muss. Vielleicht geht es ja auch weniger um die Künstler selbst als vielmehr um unsere Präferenz für ein bestimmtes ästhetisches Erleben. In jedem Fall liegt hier ein empirisches Problem vor, das noch nicht gut erarbeitet ist. Man sollte aber auf keinen Fall davon ausgehen, dass die Soziobiologie zu diesem Problem prinzipiell nichts zu sagen hätte.

Eckensberger: Ich halte meinen Verdacht aufrecht, dass sich soziobiologische Deutungen stets leichter anwenden lassen, wenn es um vergleichsweise reproduktionsnahe Verhaltensweisen geht. Und auf solche Beispiele stützen Sie sich laufend. In jedem Fall brauchen Sie beim künstlerischen Schaffen einen breiteren Erklärungsansatz. Aber ich habe noch einen ganz anderen Vorwurf.

Voland: Nämlich?

Eckensberger: Viele Verhaltensmuster, die die Soziobiologie vermeintlich erklärt, sind in der Regel auch ökonomisch interpretierbar: Ich verhalte mich so und nicht anders, weil es für mich in irgendeiner Form förderlich ist. Einfach ausgedrückt: Ich mehre oder sichere meinen Besitz, meinen Einfluss durch mein Handeln – und folge dabei eben dem ökonomischen Prinzip. Die Gene brauche ich für eine solche Argumentation nicht. Und schlimmer noch: Das „Verhalten" der Gene wird ja selbst dem ökonomischen Kalkül unterworfen! Das ökonomische Prinzip geht dem soziobiologischen also voraus. Damit aber ist die Theorie eigentlich selbst eine ökonomische Theorie – und folglich Teil der Kultur, die sie zu erklären sucht!

Die Diskussion geht weiter: Was steuert unser Verhalten? Äußern Sie unter **http://www.wissenschaft-online.de/spektrum/** Ihre Meinung zu den Thesen von Prof. Voland und Prof. Eckensberger!

Spektrum: *Welche Rolle spielt der Begriff „Intention" für Sie?*

Eckensberger: Er ist enorm wichtig! Was macht den Menschen denn aus? Ich möchte hier nicht pathetisch von unserer Sonderstellung in der Natur sprechen, aber es gibt zwei Dinge, die den Menschen fundamental vom Tier unterscheiden: seine Selbstreflexivität und seine Intentionalität. Einerseits wissen wir, dass wir existieren und dass wir alles, was wir tun, zumindest im Prinzip auch immer anders tun könnten. Andererseits ist menschliches Handeln nicht einfach irgendwie determiniert, sondern gewollt und intendiert. Es hat keine Ursachen, sondern Gründe! Der Mensch kann sich aufgrund seiner potenziellen Selbstreflexivität und Intentionalität im Prinzip auch gegen seine eigene Natur verhalten, wenn er möchte.

Voland: Woher wissen Sie das?

Eckensberger: Das weiß ich aus der psychologischen Empirie. Der Mensch ist prinzipiell reflexions- und intentionsfähig. Wir wissen doch alle, dass wir hier sitzen, um zu diskutieren, oder? Ich könnte jetzt aber auch aufstehen und den Raum verlassen. Damit würde ich kein Naturgesetz, sondern nur eine kulturelle Konvention brechen. Mit anderen Worten: Es gibt parallel zur Naturgesetzlichkeit – und dazu gehören freilich auch adaptive Strategien der Soziobiologie – so etwas wie kulturelle Regelsysteme, die wesensmäßig ganz anderer Art sind. Die spannende Frage lautet: In welcher Beziehung stehen die beiden Systeme zueinander?

Voland: Stopp. Natürlich gibt es Selbstreflexivität, aber ich bezweifle, dass sich daraus irgendetwas ableiten ließe, was den Menschen befähigt, sich gegen seine Natur zu entscheiden. Wie alle kognitiven Leistungen sind Selbstreflexivität und Intentionalität biologisch evolviert. Es muss in irgendwelchen sozialen Szenarien früherer Zeiten einfach vorteilhaft gewesen sein, sich mental in bestimmte Situationen einzuordnen, um darüber zur bestmöglichen Durchsetzung persönlicher Interessen zu gelangen. Und nur deswegen verfügen wir heute über Selbstreflexivität.

Eckensberger: Um eines klar zu stellen: Ich behaupte keineswegs, dass wirklich jede einzelne Handlung „reflektiert" ist. Viele, vielleicht sogar die Mehrzahl unserer täglichen Handlungen sind hochgradig

automatisiert. Aber grundsätzlich sind sie reflektierbar; das ist das Entscheidende.
Spektrum: *Können Sie das näher ausführen?*
Eckensberger: Nehmen Sie das Beispiel Tennis! Da ist jeder Ballwechsel eine Handlung, genau so wie jedes gewonnene Match. Sogar die Karriere des Tennisspielers ist eine Handlung. Und alle diese Handlungen haben verschiedene Bewusstseinsgrade: Der einzelne Ballwechsel hat in der Regel kaum noch eine reflexive, intentionale Struktur; er ist hochgradig automatisiert. Das macht aber noch nicht das ganze Tennisspiel zu einem automatischen, reflexhaften Geschehen!
Voland: Was leiten Sie aus Ihrem Beispiel ab?
Eckensberger: Selbstreflexivität und Intentionalität sind Eigenschaften, die den Menschen prinzipiell auszeichnen. Ich habe gar kein Problem, beides als entwicklungsgeschichtlich entstanden anzusehen. Sicherlich brachte das alles erhebliche Anpassungsvorteile mit sich. Aber wir nehmen laufend Weltdeutungen vor – das macht den Menschen besonders –, und dadurch wird unser Handeln mit bestimmt. Die Gene reichen dazu nicht aus. Es gibt eine Metaebene. Für Sie, Herr Voland, scheint die Kultur indes nur eine Verwirklichung des menschlichen Genoms zu sein.
Voland: So ist es – allerdings bei Anerkennung der Vermittlungsebene zwischen Genom und Kultur, den adaptiven Leistungen des menschlichen Gehirns.
Eckensberger: Kultur bezieht sich aber nicht nur auf „geregeltes Verhalten“. Das gibt es auch bei Tieren. Sie beruht wesentlich auf Bedeutungsstrukturen, und diese wiederum basieren vermutlich – zumindest aber zum Teil – auf unserer Selbstreflexivität. Ich persönlich glaube sogar, dass der wesentliche Kern der Kultur aus unserem Todesbewusstsein erwachsen ist und erwächst.
Spektrum: *Da kommt die Religion ins Spiel?*
Eckensberger: Richtig. Religion ist immer der Versuch, den Tod auszutricksen. Es gibt keine Religion, die sich nicht mit dem Tod und dem, was danach passiert, auseinander setzt. Das ist übrigens sehr interessant: Auch die Soziobiologie hat so gesehen eine religiöse Struktur, denn auch sie überlistet den Tod.
Spektrum: *Inwiefern?*
Eckensberger: Der einzelne Organismus ist für sie nicht wichtig. Es sind die Gene, die weiterleben.
Spektrum: *Ein interessanter Aspekt! Herr Voland, sind Sie religiös aktiv, wenn Sie sich soziobiologisch betätigen?*
Voland: Also, ich weiß jetzt nicht, ob irgendein Naturwissenschaftler, der sich mit längeren Zeiträumen beschäftigt – der Kosmologe, der Paläontologe oder auch der Soziobiologe – ob der ganz persönlich für sich den Tod überlisten will. Das ist eine Hypothese. Jedenfalls ist die Soziobiologie nicht aus dem Bedürfnis heraus entstanden, die Todesfurcht zu bekämpfen.

Glossar

Gen-Egoismus: Metapher dafür, dass die Gene primär für ihre eigene Verbreitung sorgen. Die Individuen dienen den „egoistischen Genen“ dabei als Vehikel.
Soziobiologie: Zweig der Verhaltensforschung, der soziales Verhalten streng unter dem Gesichtspunkt evolutionärer Selektionsmechanismen erklärt.

Eckensberger: Bedürfnis hin oder her – sie tut es aber.
Voland: Nein. Es geht darum, dass Naturwissenschaftler mit ihrem Instrumentarium erkannt haben, dass es informationstragende Einheiten gibt, die eben das einzelne Leben überdauern. Und dazu gehören die Gene. Ich behaupte, was immer wir an Leistungen erbringen, was immer wir an Verhaltensweisen an den Tag legen, welche Ideen wir auch immer haben – es gründet auf unserer Naturgeschichte.
Spektrum: *Also am Ende doch ein deterministisches Weltbild?*
Voland: Als Biologe kann ich nur in einem deterministischen Weltbild leben! Ich habe keine anderen Interpretationsschemata als die Zwangsläufigkeit alles dessen anzunehmen, was ich beobachte. Als Bürger und Individuum ist mir diese Einsicht freilich nicht sonderlich sympathisch, denn ich erfahre mich ja als entscheidungsfrei und in der Lage, über mich selbst zu bestimmen. Insofern lebe ich in zwei verschiedenen Welten.
Spektrum: *Was unternehmen Sie, um diesen Widerspruch zu überbrücken?*
Voland: Ich arbeite daran, Schwachstellen im Gedankengebäude meiner eigenen Wissenschaft aufzudecken. Ich suche immer auch nach möglichen Irrtümern in der Theorie. Bislang habe ich aber noch keine grundlegenden Fehler gefunden und nehme die Soziobiologie folglich bis auf weiteres als richtig an. Mit dem Widerspruch muss ich also leben.
Eckensberger: Das ist ja interessant! Sie sehen also eine Spannung zwischen Ihrer persönlichen phänomenologischen Erfahrung und Ihrer eigenen Theorie? Es ehrt Sie, dass Sie das so frei zugeben! Ich denke, dass es nicht unpraktisch wäre, als Mensch eine Theorie zu vertreten, die auch auf einen selbst zutrifft – ohne sozusagen permanent mit einer Klemme im Kopf herumrennen zu müssen.
Voland: Wäre das Maß für die Güte einer Theorie ihre subjektive Verdaulichkeit, hätte die Wissenschaft nie das geozentrische Weltbild überwunden.
Spektrum: *Halten Sie dann am Ende doch nichts von der Soziobiologie, Herr Eckensberger?*
Eckensberger: Natürlich können wir nur aufsetzen auf dem, was entwicklungsgeschichtlich entstanden ist. Aber wir haben mit der Kultur eine Anschlussorganisation geschaffen, die erweiterte Möglichkeiten besitzt und selbst nicht zwingend soziobiologisch zu rekonstruieren ist. ■

Die Fragen stellten Reinhard Breuer, Adelheid Stahnke und Carsten Könneker von Spektrum der Wissenschaft.

ECKENSBERGER: „Ich denke, dass es nicht unpraktisch wäre, als Mensch eine Theorie zu vertreten, die auch auf einen selbst zutrifft.“



(Seiten 100, 101 und 102: Anzeige und Beihefter)

EINLADUNG ZUM ABONNEMENT

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

WIR MÖCHTEN AUCH IHRE FREUNDE FÜR UNS GEWINNEN

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.



ZEN GARDEN

Stress im Büro? Diese Visitenkartenbox können Sie zur Entspannung nutzen und gleichzeitig zur Aufbewahrung Ihrer Visitenkarten (Maße 20×12×10 cm)

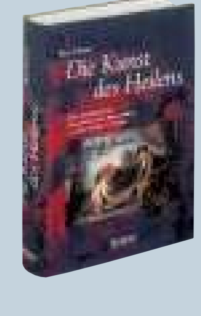


PICKNICK-RUCKSACK

Genießen Sie die ersten warmen Sonnenstrahlen bei einem Picknick zu zweit. Der praktische Rucksack enthält für zwei Personen Teller und Sektgläser aus Kunststoff sowie Besteck und Kellnermesser aus Edelstahl. Er ist mit einem Kühlfach und zwei Flaschenhaltern ausgestattet.

DIE KUNST DES HEILENS

Dieses Buch bietet eine fesselnde Übersicht über 5000 Jahre Medizin. In kurzen, prägnanten Porträts werden vielfältige Persönlichkeiten vorgestellt, deren Leistungen für die stetige Entwicklung der Medizin von entscheidender Bedeutung waren. Dem Autor Roy Porter gelingt es, jede Phase dieser komplexen Geschichte in ihren politischen, sozialen und demographischen Rahmen zu stellen.



NUTZEN SIE DIE VORTEILE DES ABONNEMENTS:

Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis für monatlich DM 11,85 einschließlich Versand; Schüler und Studenten zahlen nur DM 10,30.

Das Postkartenbuch „Die kleine Astro-Galerie“ schenken wir Ihnen als Dank für Ihr Interesse.

Außerdem haben Sie als Abonnent freien Zugang auf unser Online Archiv. Dort liegen für Sie alle zurückliegenden Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft seit 1993 im Volltext bereit.



BEGINNEN SIE IHR ABONNEMENT MIT DER NÄCHSTEN AUSGABE UND SENDEN SIE NEBENSTEHENDE BESTELLKARTE AN UNS AB.

GENFORSCHUNG

Zu wenig Leben in den Lebenswissenschaften?

Das menschliche Erbgut wurde mit ungeheurem Aufwand entziffert. Doch sind damit die wirklich wichtigen Ziele der biologischen Forschung erreicht?

Von Josef H. Reichholf

Die Insider wussten es, die interessierte Öffentlichkeit konnte es erahnen, aber ein Paukenschlag wurde es trotzdem, als „Nature“ und „Science“ zeitgleich Mitte Februar das Ergebnis veröffentlichten: Das Erbgut des Menschen ist kartiert! Basenpaar für Basenpaar, Chromosom für Chromosom kann nun jeder, der etwa das „Nature“-Heft Nummer 6822 für den Preis eines einfachen Mittagessens erworben hat, über mehr als dreieinhalb Meter ausgebreitet selbst sehen, wie das menschliche Erbgut aussieht. Was für ein Triumph der Biowissenschaften! Das Datum ist nun genau so gewiss Wissenschaftsgeschichte wie die Entdeckung der Doppelhelix-Struktur der DNA durch James Watson und Francis Crick im Jahre 1953. Jetzt kommt es „nur“ noch darauf an, die Botschaft der Gene zu entschlüsseln.

Dass es damit noch nicht ganz so weit ist, geht aus einem „Nebenergebnis“ hervor: Die Zahl der Gene im menschlichen Erbgut musste nämlich überraschenderweise von den vorher ziemlich sicher angenommenen 80 000 bis 100 000 auf lediglich etwa 30 000 herunterkorrigiert werden! Was das Verstehen der Gene und ihrer Funktionen jedoch nicht gerade erleichtern wird – bedeutet es doch, dass diese weitaus geringere Zahl dafür umso komplexere Wechselwirkungen zwischen den Genen nach sich zieht. Die insbesondere bei Nicht-Genetikern verbreitete, in der Öffentlichkeit wohl auch so „verstandene“ Annahme, dass man, wenn die Entschlüsselung vollends gelungen sein wird, jedem Gen auch eine bestimmte Eigenschaft oder Wirkung zuteilen kann, hat sich nach dieser Korrektur als höchst trügerisch, ja unwahrscheinlich erwiesen.

Aber diese Problematik wird die Genforschung schon meistern. Dafür sollen nicht zuletzt die massiven Finanzspritzen sorgen, mit deren Hilfe auch deutsche Genforscher international gut im Rennen bleiben können, wie die jüngst genehmigten 870 Millionen Mark der Bundesregierung. Warum eigentlich dieser Aufwand? Die Frage taucht unweigerlich immer dann auf, wenn es ums Geld geht – um viel Geld!

Der Mensch ist mehr als die Summe seiner Gene

Mit „Life Science live“, einer der Großveranstaltungen im diesjährigen „Jahr der Lebenswissenschaften“, ist die moderne Genforschung daher angetreten, sich selbst, ihren Bedarf und ihre Vorgehensweise zu rechtfertigen. Das hat sie, diese scheinbar neue Version der Biologie, die sich plötzlich überall „auf Deutsch“ präsentiert, auch bitter nötig. Ist sie doch in den Verruf gekommen, gerade dorthin bis ins letzte Detail vorzudringen, wo man sich am wenigsten hineinschauen lassen möchte: ins eigene Erbgut! Da fehlt bloß, dass „versicherungs“ eingefügt wird zwischen „Lebens-“ und „-wissenschaft“. Denn an den Genen wird sich erkennen lassen, welche Zukunft man hat und mit welchem Ende man rechnen muss. Lebenswissenschaft zum besseren Verständnis des Sterbens also? Oder zur Diskriminierung?!

Vermutlich werden wir bald der Gen-Karte direkt entnehmen können, an welchen Sequenzen sich „der Mensch“ von seinen nächsten Verwandten, den Schimpansen, unterscheidet. Dann wissen wir (endlich?), was uns zum Menschen macht! Oder zum „Weißen“, weil auch das den Genen zu entnehmen sein wird. Oder zum Genie, zum Mittelmäßigen oder zum Untauglichen für die Welt des 21. Jahrhunderts! Sollen solche (Er-)Kenntnisse überhaupt angestrebt werden?

An derartigen Problemen formieren sich die Gegner der Genforschung zu massivem Widerstand. Je weniger sie darüber wissen, was Sache und Stand der Forschung ist, desto stärker wird ihr Schulterschluss mit anderen Nichtwissern. Und umso größer wird ihr politischer Druck werden, auch wenn er den Fortschritt der Wissenschaft nicht aufhalten kann und für die Gesellschaft zum Nachteil gerät. Auf die positiven Ergebnisse der Forschung werden die Gegner allerdings später sicherlich nicht verzichten wollen. Aber dieses „später“ existiert jetzt noch nicht! Finanziert werden muss in der Gegenwart, um in der Zukunft Früchte ernten zu können. Warum ist das nur so schwer zu verstehen? Warum muss immer gleich das Schlimmste angenommen werden? Im wirklichen Leben bedienen wir uns doch höchst freimütig der Segnungen von Wissenschaft und Technik! Kaum jemand verzichtet aus Prinzip und Überzeugung darauf.

Müssen wir also das neue Wissen nur besser vermitteln? Über Aktionen wie „Life Science live“ etwa? Dass sich bei Biologen, die nicht in der Genforschung tätig sind, die Begeisterung, hierbei mit- ▶



Das menschliche Erbgut und die Vielfalt der Individuen: „Nature“-Titelblatt vom 15. Februar

zuwirken, sehr in Grenzen hält, erstaunt. Oder auch nicht. Sind die anderen Zweige der Biologie bloß neidisch auf das öffentliche Interesse und die Förderung, die der voll-quantitativen Erfassung des menschlichen Erbgutes zuteil werden?

Für die Öffentlichkeit wäre eine solche interne Konkurrenz belanglos oder lächerlich; für die Lebenswissenschaften selbst aber nur nachteilig. Deshalb kann und darf es auch darum nicht gehen! Es geht um anderes. Es geht um „das Leben“ in den Lebenswissenschaften. Davon verspürt auch eine wohlgesonnene Öffentlichkeit in den Tiefen der Genforschung so gut wie nichts mehr.

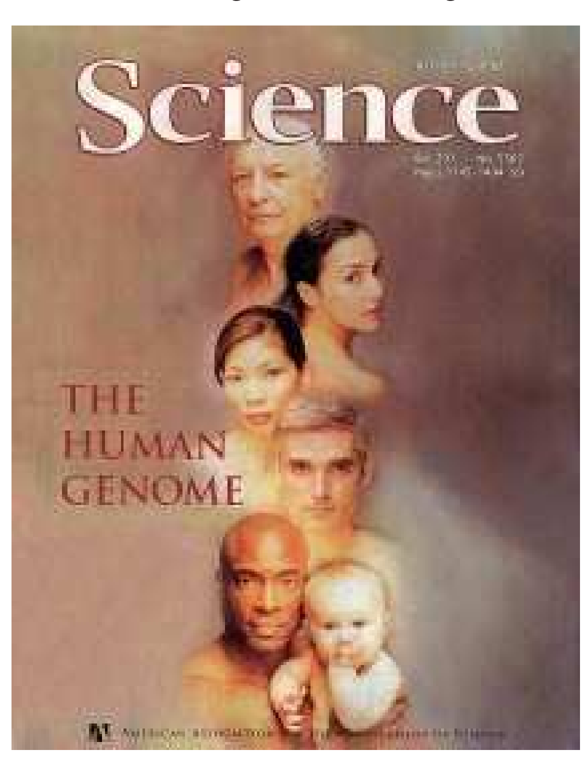
Schraubig gewundene, durch Treppenstufen miteinander verbundene Moleküle lassen sich nur schwer mit dem Leben selbst identifizieren. Eher werden sie als bedrohlich empfunden, weil das, was darin festgeschrieben sein soll, kein Lebewesen, keine Pflanze, kein Tier, keinen Menschen aus Fleisch und Blut abbildet. Und schon gar nicht die großartige Vielfalt des Lebens. Was soll ein Nicht-Genetiker davon halten, dass sich Menschen und Schimpansen zu fast 99 Prozent in ihren Genen gleichen? Gelebt wird von und mit dem einem Prozent Unterschied, meint man! Oder mit dem Bruchteil eines Promilles, das jeden Menschen zum unwiederholbaren Einzelwesen, zum Individuum macht. Das Leben lebt anders als in Gensequenzen, wenn Schmetterlinge vorübergleiten, Vögel singen und Blumen erblühen.

Was ist von der Biodiversitäts-Konvention geblieben?

Dieses Leben in seiner ganzen Fülle zu erfassen, zu ordnen, zu verstehen und für die nachkommenden Generationen zu erschließen und zu erhalten, war die Biologie einstens angetreten. Vor mehr als eineinhalb Jahrhunderten brach sie auf zum großen, damals schon globalen Unternehmen „Biodiversität“. Biologen reisten in die fernsten Winkel der Erde, um unter schwierigsten Bedingungen nach den Schätzen des Lebens zu suchen. Damals konnte die Öffentlichkeit noch staunen über die Wunder der Natur! Was Charles Darwin mit seiner Entdeckung der Evolutionsmechanismen auf eine solide Basis gestellt hatte, wurde zum schlagenden Herz der Biowissenschaften. Und wuchs und gedieh, bis zwei Weltkriege die Blüte unterbrachen und weithin zum Verdorren brachten.

Erst die Umweltkrisen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts führten zur Rückbesinnung auf die Notwendigkeit, das Leben und sein Wirken im Naturhaushalt besser zu verstehen. Das war auch die Zeit, in der Konrad Lorenz und die Vergleichende Verhaltensforschung das Staunen zurückholten und Mitgefühl und Verantwortungsbewusstsein für das Leben auf der Erde wieder wachsen ließen. Bis es im „Erdgipfel von Rio“ 1992 den Höhepunkt erreichte. Von nun an galt es als vordringlichstes Ziel und als Verpflichtung für die Staatengemeinschaft der Erde, die Biodiversität zu erfassen und für die Zukunft nachhaltig zu sichern. Was ist davon, was ist von der „Biodiversitäts-Konvention“ noch nicht einmal ein volles Jahrzehnt nach Rio übrig geblieben? Die großen Forschungsgelder fließen in ganz andere Bereiche: In die Bereiche der Nanowelten im Kleinsten und in die Datenfluten für die Welt- und Klimamodelle! Globaler Wandel wurde plötzlich so überaus wichtig, als ob Wandel etwas Neues und nicht die Natur der Natur wäre!

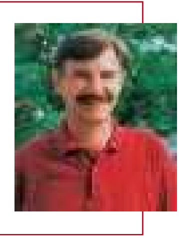
Auf der Strecke bleibt das, was einmal „Ökologie“ war und als gute Wissenschaft und nicht als Ideologie hätte betrieben werden können. Zum Wohle der Menschheit. Auf der Strecke blieb auch die Biodiversitätsforschung, wohl weil sie sich zu sehr, zu konkret, mit dem Leben und seinem Überleben befassen wollte. Der Soziobiologe Edward O. Wilson hatte es in seinem großen Werk über die Vielfalt des Lebens 1992 so treffend formuliert: „Entzückt über das ständige Auftauchen neuer Technologien und durch die großzügige Bereitstellung von Mitteln für die medizinische Forschung unterstützt, haben die Biologen einen schmalen Sektor der Front eingehend untersucht. Jetzt ist es an der Zeit, das Blickfeld zu erweitern, das große Unternehmen Linnés fortzuführen und die Erfassung der Biosphäre zum Abschluss zu bringen. Die Erweiterung des Blickfeldes ist vor allem deshalb dringlich, weil dem Studium der Biodiversität im Unterschied zu den übrigen Wissenschaften eine zeitliche Grenze gesetzt ist.“



Welche Gensequenzen machen den Menschen zum Menschen, welche zum Individuum? „Science“-Titelblatt vom 16. Februar.

Diese „zeitliche Grenze“ gerät mehr und mehr zum Wettlauf mit der Zeit, weil wir, gerade auch wir in Deutschland, weit eher bereit waren, Milliardenbeträge für das Vollpumpen industriemaschinengleich „betriebener“ Rinder mit Futtermitteln aus den Tropen aufzuwenden als für die Erfassung der Vielfalt des Lebens einzusetzen. Für dieses Futter wurde Biodiversität in beispiellosem Tempo vernichtet, bevor sie untersucht werden konnte. Und Tiermehl aus dieser so betriebenen Überflussproduktion hat man fast zum Perpetuum mobile des Recyclings gemacht, um eben diese Rinder mit neuen Milliarden wieder zu töten und zu „entsorgen“! Manches, vielleicht das meiste von der gegenwärtigen Agrarkrise, wäre uns erspart geblieben, hätten die biologische und die ökologische Forschung die Mittel bekommen, die in der Agrarwirtschaft lediglich vergeudet worden sind. Dann wäre auch die moderne Genforschung anders eingebunden in eine umfassende Lebenswissenschaft voller Leben. ■

Josef H. Reichholf ist Professor an der Technischen Universität München und Leiter der Wirbeltierabteilung der Zoologischen Staatssammlung München.



AM RANDE

Legalisierte Drittmittel oder Korruption?

Warum ein Bonner Mediziner wegen Bestechlichkeit verklagt wurde

Wer an einer deutschen Universität sehr Gutes oder gar Außergewöhnliches leistet, wobei ihm Sponsoren mit Stipendien oder anderen liquiden Mitteln geholfen haben, kann sehr schnell akademisches und staatliches Verdikt auf sich ziehen. Wo kämen wir denn auch hin, wenn wir die Förderung einer Elite auch noch belohnten? Die soll gefälligst bei Stellenbesetzungen ganz hinten anstehen, darf keineswegs mit dem akademischen Renommee und der guten Geräteausstattung glänzen, die sie – igitt! – mit Drittmitteln, also mit fremder Hilfe erwarb.

Es ist zwar schon einige Jahre her, aber typisch für universitären Futterneid, was eine junge ostdeutsche Postdoktorandin erlebte: Mit dem Stipendium einer Stiftung hatte sie sich in Westdeutschland auf eine Professur an ihrer Heimathochschule vorbereitet. Diese sah sie zwar als hoch qualifiziert an, berief sie aber trotzdem nicht. Der Grund: Sie bringe von ihrem Westaufenthalt bessere Voraussetzungen mit als die anderen Bewerber. Um diesen gleiche Chancen zu eröffnen, müsse man die ehemalige Stipendiatin eben aus dem Berufungsprozess herausnehmen.

Mit ähnlichen Argumenten geht seit der Neufassung der Korruptionsparagrafen des Strafgesetzbuches im Jahre 1997 die Staatsanwaltschaft in ganz Deutschland gegen Medizinprofessoren vor, deren Klinik für ihre Forschung Mittel von der Industrie erhält. In Bonn wollte sie kürzlich den Direktor der Klinik für Nuklearmedizin, Hans-Jürgen Biersack, wegen Bestechlichkeit anklagen.

Was war geschehen? Biersack hatte zwischen 1991 und 1999 bei mehreren Pharmafirmen rund zwei Millionen Mark eingeworben. Sie wurden auf dem Drittmittelkonto der Medizinischen Einrichtungen Bonn gutgeschrieben. Dort konnte er sie für Forschungsvorhaben abrufen. Die Staatsanwaltschaft folgerte daraus, Biersack habe „durch die Verbesserung der Ausstattung seiner Klinik“ mit Hilfe von Drittmitteln aus der Industrie seinen persönlichen Ruf als Wissenschaftler und Klinikchef verbessert. Damit habe er sich einen unzulässigen Vorteil erwirtschaftet. Das ist von ähnlicher Qualität wie das missgünstige Verhalten der ostdeutschen wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät gegenüber der im Westen weitergebildeten Postdoktorandin.

Freilich ging die Bonner Affäre letzten Februar positiver aus: Die große Wirtschaftsstrafkammer des Landgerichts nahm die Klage in diesem Punkt nicht an, weil „angesichts der den Klinikleitern durch die Hochschulgesetze auferlegten Pflichten zur Einwerbung von privaten Mitteln zum Zwecke der Forschung der so genannte mittelbare Vorteil des Klinikleiters keine strafrechtliche Bedeutung haben kann“. Er hatte auch nicht – wie andernorts etwa im so genannten „Herzklappenskandal“ geschehen – mit den Firmen Geschäfte zu überhöhten Preisen gemacht.

Der Widerspruch zwischen den Bestechungsparagrafen und dem Hochschulgesetz ist offenkundig: Nach dem Strafgesetzbuch ist bestechlich und kann zu einer Freiheitsstrafe verurteilt werden, wer ganz generell „für die Dienstausübung“ einen Vorteil annimmt. Hochschulrechtlich aber gehört die Forschung mit Mitteln Dritter zu den dienstlichen Aufgaben der Hochschullehrer.



Verzweifelt versuchen jetzt die Beteiligten, die Diskrepanz aufzulösen. Ein Runderlass des nordrhein-westfälischen Wissenschaftsministeriums soll klinische Forschung mit Regelungen ermöglichen, die das bundesweit gültige Strafgesetzbuch erheblich aufweichen: Forschungsverträge mit Dritten müssen die Hochschule als Vertragspartner ausweisen, dem Sponsoring muss der Rektor zustimmen, Beschaffungen dürfen nicht davon abhängen, ob die Klinik vom Lieferanten Drittmittel erhält.

Überzeugender wäre es allerdings, folgte man einem Vorschlag der wissenschaftlichen medizinischen Fachgesellschaften und des Hochschulverbandes und änderte das Strafgesetzbuch selbst in diesem Sinne. Diese Einrichtungen haben auch in einem „gemeinsamen Standpunkt zur strafrechtlichen Bewertung der Zusammenarbeit zwischen Industrie, medizinischen Einrichtungen und deren Mitarbeitern“ im Oktober 2000 die gesamte Problematik ausführlich dargestellt. Denn ohne Drittmittel der Wirtschaft wäre klinische Forschung in Deutschland kaum möglich.

Transparenz und Öffentlichkeit im Drittmittelbereich verlangt auch die sehr kritische Organisation „Transparency International“. Sie geht noch einen Schritt weiter: Staat und Hochschulen sollen eine von der Pharmaindustrie unabhängige klinisch-therapeutische Forschung aufbauen, in den medizinischen Fachpublikationen dürften Werbung und Wissenschaft künftig nicht mehr vermischt werden. Im Gesundheitswesen sei es die „Gesamtstruktur, deren Intransparenz möglicherweise Einfallstore für Korruption bietet“.

Freilich geht es nicht nur um die strafrechtliche Bewertung von Bestechung und Bestechlichkeit. Wie der Fall der ostdeutschen Wirtschaftswissenschaftlerin und die Argumentation der Bonner Staatsanwaltschaft im Fall Biersack deutlich machen, steckt dahinter auch eine gehörige Portion Missgunst und Minderwertigkeitsgefühl gegenüber den Erfolgreichen – keine gute Basis für die allenthalben gewünschte Förderung innovationsfähiger Eliten.

G. Hartmut Altenmüller

Der Autor ist Bonner Korrespondent von Spektrum der Wissenschaft.

KOSMOLOGIE



Timothy Ferris
Chaos und Notwendigkeit
Report zur Lage des Universums

Aus dem Amerikanischen von Anita Ehlers.
Droemer, München 2000. 480 Seiten, DM 58,–



Auf vielfältige Weise sind das Leben auf der Erde und die geologischen Prozesse, die es hervorbrachten, selbst auch Teil der kosmischen Evolution.“ Ein Satz aus der Mitte eines groß angelegten und rundum gelungenen Versuchs, eine Universalgeschichte des Alls zu schreiben. Dass im Universum irgendwie alles mit allem zusammenhängt, ist leicht gesagt; den Zusammenhängen im Einzelnen nachzugehen, ist Aufgabe der Wissenschaft; die gewonnenen Erkenntnisse so zusammenfassend nachzuerzählen wie Ferris, ist eine Kunst.

Der Autor versteht es, ins Detail zu gehen, ohne dass der Leser den Überblick verliert. Das gelingt durch eine klug aufgebaute Schichtstruktur dieses „Reports zur Lage des Universums“, der im Original an Stelle des tief schürfenden deutschen Obertitels salopp „The Whole Shebang“ heißt, also etwa „All das Zeug“. In der obersten Schicht unterhält der Bericht durch allerlei Anekdoten und Interviewzitate aus dem Wissenschaftsbetrieb; hier bewährt sich Ferris als routinierter Journalist. In der nächst tieferen Schicht ist das Buch eine kompakte Einführungsvorlesung in die moderne Kosmologie, verfasst vom Professor der Astronomie und Leiter eines eigenen Observatoriums in Kalifornien. Von dieser Ebene aus werden immer wieder noch tiefere Exkurse in die Quantenphysik angeboten – meist in Form ausführlicher Fußnoten, einmal in Gestalt eines ganzen Kapitels. Dieser Abschnitt wird aufmerksamen Lesern unserer Zeitschrift den Genuss verschaffen, vieles wiederzuerkennen; das Phänomen der Quantenverschränkung ist kaum je so kompakt und eingängig dargestellt worden wie bei Ferris.

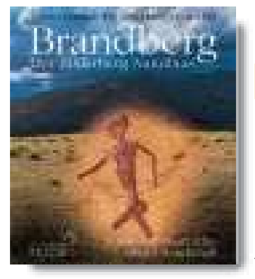
Nur selten erlaubt sich der Autor eine allzu spezielle Abschweifung und belastet den flotten Text in der Eile mit unnötigen oder schlecht verarbeiteten Einzelheiten. So ist die Erklärung des Sunyaev-Zeldovich-Effekts (S. 73) so radikal verkürzt, dass sie falsch wird. Ein andermal wird für „Leser, die es gern genau wissen möchten“ (S. 171), ein hochspekulatives Teilchen, das Neutralino, durch unverständliches Kauderwelsch beschrieben; daran könnte in diesem Einzelfall aber auch die – ansonsten routinierte – Übersetzung schuld sein.

Gegen Ende geht Ferris auf die Wahrscheinlichkeit von intelligentem Leben im Universum ein. Nach einer umsichtigen Diskussion des anthropischen Prinzips – wie muss das All beschaffen sein, damit es unseresgleichen hervorzubringen vermag? – wagt er sich zuletzt an die brisante Gretchenfrage: Legt die moderne Kosmologie mit ihrem Standardmodell eines seit dem Urknall expandierenden Universums einen Schöpfergott nahe? Ferris bringt starke Gegenargumente, wählt aber schließlich doch die diplomatische Antwort, dass die Kosmologie weder für noch gegen eine göttliche Schöpfung spreche. Er fände es darum „vorteilhaft, wenn wir Gott aus der Kosmologie ganz herausließen“.

Alles in allem ein äußerst empfehlenswertes Buch für jeden Menschen, der beim Anblick des nächtlichen Sternenhimmels einmal in Staunen verfallen ist und den diese kosmologische Neugier nie wieder verlassen hat.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.



UR- UND FRÜHGESCHICHTE

Tilman Lenssen-Erz und Marie-Theres Erz
Brandberg
Der Bilderberg Namibias

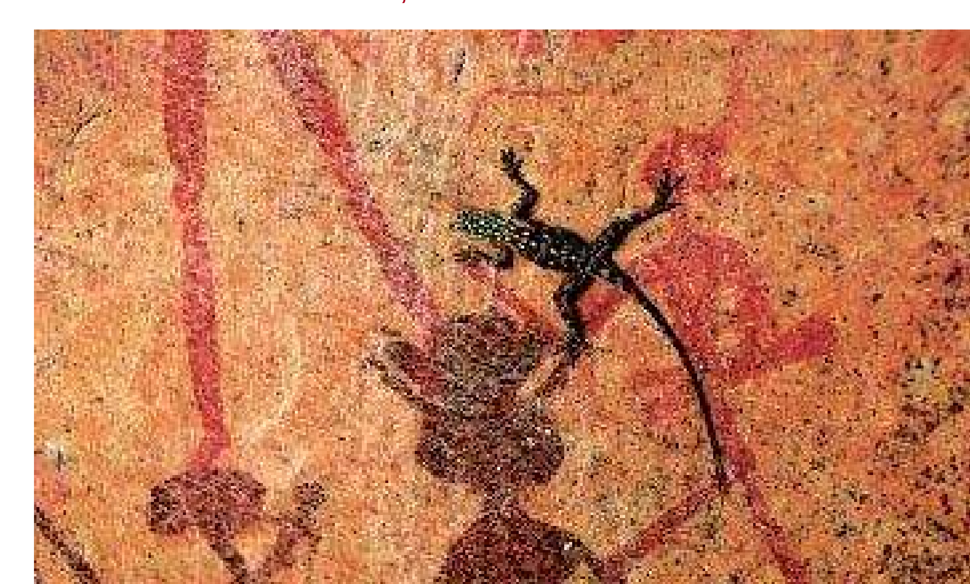
Thorbecke, Stuttgart 2000. 128 Seiten, DM 79,–

Steinzeitkunst – der Begriff lässt einen zuerst an die berühmten Höhlen von Lascaux und Altamira denken, die mit ihren beeindruckenden Bildern von Bisons und Pferden fester Bestandteil der europäischen Kulturgeschichte geworden sind. Die Entdeckung der Chauvet-Höhle im Tal der Ardèche bewies, dass im steinzeitlichen Europa sogar schon vor mehr als 30000 Jahren große Künstler gelebt haben müssen.

Aber Petroglyphen (Felsbilder) sind keineswegs eine europäische Spezialität. In Afrika sind – auf Grund der günstigeren Witterungsverhältnisse – sogar noch viel mehr Bilder steinzeitlicher Künstler erhalten. Einer der reichhaltigsten Fundorte ist der Brandberg in Namibia. Auf einem fast vollständig von Savanne und Wüste umgebenen Granitmassiv mit einer Höhe von bis zu 2573 Metern und einem Durchmesser von 30 Kilometern verteilen sich 45000 Felsbilder an 1000 Fundstellen.

Mit Lascaux und Altamira haben die 2000 bis 6000 Jahre alten Bilder am Brandberg nur sehr wenig gemein. Es stehen nämlich nicht die Tiere im Mittelpunkt, sondern die Menschen.

Als Harald Pager einmal gefragt wurde, wie er denn damit fertig werde, so lange vollkommen allein im Brandberg zu leben und zu arbeiten, antwortete er: „Oh, das ist kein Problem. Man kann sich ablenken und sich zum Beispiel mit den Eidechsen unterhalten. Ein Problem wird es erst, wenn sie antworten …“







Die „Weiße Dame“ (links) wird von einer Prozession reich geschmückter Menschen begleitet und darüber von einer Reihe Oryx-Antilopen. Die zeichnerische Rekonstruktion durch Klaus Günther (oben) macht Einzelheiten des Körperschmucks deutlich, vor allem das Detail, an dem „sie“ als Mann zu erkennen ist.

Oft erinnern die menschlichen Figuren dabei an simple Strichmännchen. Doch bei genauerem Hinsehen entdeckt man zahlreiche aufschlussreiche Details, so auch im Fall der wohl berühmtesten Darstellung vom Brandberg: Die „Weiße Dame“ ist eine Figur, die lange Zeit für eine weißhäutige Frau gehalten wurde. Da der anerkannte französische Felsbildforscher Henri Breuil diese Interpretation stützte, konnte sich eine Legende entwickeln, nach der einst eine weißhäutige Königin oder Göttin am Brandberg geherrscht hatte. Inzwischen haben die Wissenschaftler jedoch nachgewiesen, dass es sich bei der teilweise weiß bemalten Figur um einen Mann mit Körperbemalung handelt; eindeutig männliche Geschlechtsmerkmale waren bei früheren Untersuchungen anscheinend übersehen worden (Bild oben).

Ein einziger Mensch, der Grafiker Harald Pager, hat von 1977 bis zu seinem Tod 1985 im Alleingang die Bilder vom Brandberg abgezeichnet; 85 Prozent des Gesamtbestandes hat er auf diesem Wege erfasst. Das Heinrich-Barth-Institut der Universität Köln, das auch Pagers Nachlass verwaltet, hat sich zum Ziel gesetzt, die Gesamtheit der Felsbildstellen am Brandberg zu katalogisieren und zu publizieren, und hat bisher drei Bände für die Fachleute publiziert.

Der Thorbecke-Verlag hat in seiner Reihe „Speläothek“ bereits prächtige Bildbände zu mehreren bekannten europäischen Felsbild-Höhlen herausgebracht. Für das vorliegende Werk gewann er als Autoren das Prähistoriker-Ehepaar Tilman Lenssen-Erz und Marie-Theres Erz, das über das Heinrich-Barth-Institut seit langem mit den Felsbildern vertraut ist: Er leitet seit 1986 die Felsbildforschung des Institutes, während sie dort für die technischen Abläufe des Felsbildprojektes verantwortlich ist. Sie erstellte auch die meisten Fotos für dieses Buch.

Erfreulich ist, dass die Autoren sich weitgehend von der Aufmachung wissenschaftlicher Bücher lösten. Als Nötigstes übernahmen sie lediglich ein kommentiertes Literaturverzeichnis. Für Leser, die sich nur nüchtern und auf die Schnelle informieren wollen, mag ein Nachteil sein, dass es keine harte Unterteilung des Buches in Kapitel wie „Zur Datierung“ oder „Der Stil der Felsbilder“ gibt. Der etwas geduldigere Leser findet dennoch alles, was er erwartet.

Die „Weiße Dame“ ist ein Mann

Ungewöhnliche Zwischentitel wie „Von Regenbeinen und Regenhaaren“ greifen das Geheimnisvolle der Petroglyphen auf und locken damit den Leser von Abschnitt zu Abschnitt. Mit den Regenbeinen oder -haaren sind die unterschiedlichen Formen der Regenwolken gemeint; genau diese Deutung findet sich auch in Zitaten einiger Buschmänner vom Ende des 19. Jahrhunderts: „Der Regen, der herabströmt, das sind die Regenbeine, auf denen er voranschreitet.“

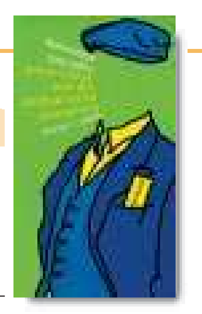
Folgt der Leser weiter den Verlockungen des Buches, so wird er erkennen, dass die Autoren ihrer wissenschaftlichen Aufklärungspflicht durchaus nachkommen. In leicht verständlichen Worten werden auch so komplexe Themen wie die Datierung der Felsbilder, die Herstellung der für die Petroglyphen verwandten Farben oder auch die Auswertung von Bild-Statistiken erklärt.

Aus den zwei gegensätzlichen Geistesschulen in der Felsbildforschung ziehen die Autoren den größtmöglichen Nutzen: Sie verwenden sowohl eine statistische Auswertung der Felsbilder wie auch Vergleiche mit den Verhaltensweisen und Erzählungen der San-Buschmänner, der heute in der Kalahari lebenden Nachkommen der Felsbildmaler. Diese Möglichkeit, auch ethnologische Forschung zu treiben, bietet sich den Wissenschaftlern in Europa so nicht.

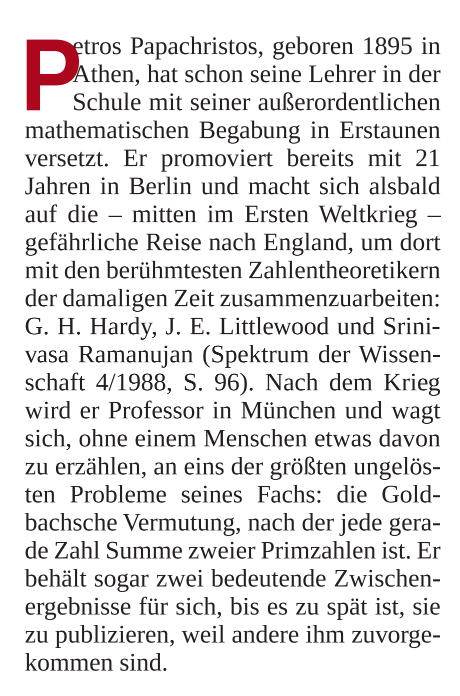
Dieses Buch ist allen zu empfehlen, die sich für prähistorische Kunst begeistern können und einen Einstieg in die moderne Felsbildforschung suchen. Mit den herrlichen Fotos, die auch die wunderschöne Natur am und um den Brandberg erfassen, und der Kartierung der wichtigsten Felsbildstellen fordert der Band geradezu zu einer Reise nach Namibia auf. Die Autoren geben auch Tipps zum Verhalten vor Ort – aber wegen des prachtvollen Großformats sollte man das Buch selbst vielleicht nicht mit auf die Reise nehmen.

Rainer Fahr

Der Rezensent ist Archäologe und freier Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.



ROMAN



Apostolos Doxiadis

Onkel Petros und die Goldbachsche Vermutung

Aus dem Englischen von Maren Radbruch.
Lübbe, Bergisch Gladbach 2000. 223 Seiten, DM 29,80

Petros Papachristos, geboren 1895 in Athen, hat schon seine Lehrer in der Schule mit seiner außerordentlichen mathematischen Begabung in Erstaunen versetzt. Er promoviert bereits mit 21 Jahren in Berlin und macht sich alsbald auf die – mitten im Ersten Weltkrieg – gefährliche Reise nach England, um dort mit den berühmtesten Zahlentheoretikern der damaligen Zeit zusammenzuarbeiten: G. H. Hardy, J. E. Littlewood und Srinivasa Ramanujan (Spektrum der Wissenschaft 4/1988, S. 96). Nach dem Krieg wird er Professor in München und wagt sich, ohne einem Menschen etwas davon zu erzählen, an eins der größten ungelösten Probleme seines Fachs: die Goldbachsche Vermutung, nach der jede gerade Zahl Summe zweier Primzahlen ist. Er behält sogar zwei bedeutende Zwischenergebnisse für sich, bis es zu spät ist, sie zu publizieren, weil andere ihm zuvorgekommen sind.

Just um diese Zeit veröffentlicht Kurt Gödel seinen berühmten Unvollständigkeitssatz, wonach es innerhalb eines Systems wie etwa der Zahlentheorie wahre, aber innerhalb des Systems unbeweisbare Sätze gibt. Papachristos kommt daraufhin zu der (durch Gödels Satz nicht begründeten) Überzeugung, die Goldbachsche Vermutung sei unbeweisbar, gibt seine Bemühungen auf – und wenig später die Mathematik überhaupt, als die Nazis ihn aus Deutschland vertreiben.

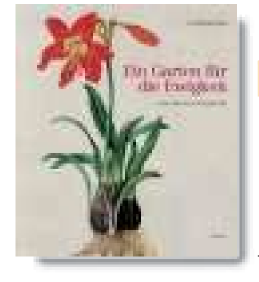
Erst Jahrzehnte später reißt sein „wertester Neffe", der Autor des Buches, ihn durch bohrende Fragen aus beschaulichem Nichtstun. Papachristos nimmt seine Forschungen wieder auf, verkündet den Durchbruch – und stirbt in derselben Nacht an einem Schlaganfall. Den Beweis der Goldbachschen Vermutung, wenn er ihn denn hatte, nimmt er mit ins Grab, wie sein berühmter Fachkollege Pierre de Fermat den seinigen.

Natürlich ist der Held des Buches eine Erfindung von Apostolos Doxiadis, der selbst als Fünfzehnjähriger von der Columbia-Universität in New York als Mathematikstudent aufgenommen wurde und sich später von der Mathematik ab- und der Literatur zuwandte. Aber die Geschichte ist so eng mit wahren Ereignissen verwoben, dass man seinen Namen auf der Stelle in einer biografischen Datenbank suchen möchte. Bis zum tragischen Ende bleibt die Geschichte spannend.

Aber lassen Sie sich von der unterschwelligen Botschaft nicht in die Irre führen! Wenn man Doxiadis glauben will, ist es das Schicksal eines Weltklasse-Mathematikers, entweder jung zu sterben (Abel, Galois, Ramanujan) oder verrückt zu werden (Cantor, Gödel, Onkel Petros). Aber in dieser einseitigen Auswahl hat er Gauß, Hilbert und viele andere unterschlagen, die bei klarem Verstand alt geworden sind. Auch Andrew Wiles wirkt vollkommen normal, wenn man davon absieht, dass er die Fermatsche Vermutung bewiesen hat.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



BOTANIK

H. Walter Lack

Ein Garten für die Ewigkeit
Der Codex Liechtenstein

Benteli, Bern 2000. 344 Seiten, DM 198,–

Was uns heute die Pflanzenfotografie, war bis ins frühe 19. Jahrhundert die naturgetreue Pflanzenillustration. „Zeichnen ist Wissenschaft", hatte Leonardo da Vinci formuliert. Unter den großen Pflanzenmalern sind neben Claude Aubriet (1665–1742), den Brüdern Pierre-Joseph (1759–1840) und Henri-Joseph Redouté (1766–1852) in Paris sowie dem Heidelberger Georg Ehret (1708–1770), der hauptsächlich in London arbeitete, vor allem die Brüder Joseph (1756–1831), Franz (1758–1840) und Ferdinand (1760–1826) Bauer zu nennen. Franz arbeitete seit dem dreißigsten Lebensjahr als botanischer Illustrator an den Royal Botanic Gardens in Kew bei London. Ferdinand, der als „Leonardo der naturwissenschaftlichen Illustration" bezeichnet wird, begleitete von England aus als Illustrator den Botaniker Robert Brown (1773–1858) auf eine Australien-Expedition und verbrachte schließlich seinen Lebensabend in der Nähe des Hofgartens von Schönbrunn. Joseph wurde nach einem längeren Aufenthalt in Rom Kammermaler der Familie Liechtenstein in Wien.

Es ist das Verdienst von H. Walter Lack, Direktor am Botanischen Garten und Botanischen Museum Berlin-Dahlem, den frühen Werken der Brüder Bauer nachgespürt zu haben. Ihr erster Förderer war der Ordensmann und Arzt Norbert Boccius (1729–1806), Prior des Konvents der Barmherzigen Brüder in ihrer Heimatstadt Feldsberg (heute Valtice) in Südmähren, der als begeisterter Botaniker neben seinem Herbarium einen *hortus pictus*, einen gemalten Garten oder ein Florilegium, anlegen wollte.

Um 1770, als Joseph 14, Franz 12 und Ferdinand Bauer 10 Jahre alt waren, begannen die drei Brüder, eine „illuminierte Sammelhandschrift auf Papier in 14 Bänden im Format 35×30 cm" als „Liber regni vegetabilis" (Buch des Pflanzenreichs) zu gestalten. Die Pflanzendarstellungen der Bände 1–6 sind ausschließlich, die der Bände 7–9 größ-



Säulenkaktus



Kürbis (*Cucurbita*)

tenteils von den Brüdern Bauer angefertigt worden. Auf 2748 Abbildungen werden etwa 3100 Pflanzen aus fünf Kontinenten dargestellt. Die unter der Anleitung von Boccius entstandene „Flora universalis“ enthält die natürliche Vegetation Mährens und Niederösterreichs, schon lange in Kultur befindliche Nutz- und Zierpflanzen und nicht zuletzt solche Arten, die erst im 18. Jahrhundert nach Europa gelangten und in Gewächshäusern in Kultur gehalten wurden.

Die anfangs sehr jungen Illustratoren haben den gesamten Arbeitsvorgang allein und ohne Assistenten bewältigt. Eindrucksvoll ist das Kapitel über die einzelnen Arbeitsschritte bei der Herstellung der Farbtafeln. Die Vollendung eines einzigen Aquarells dauerte im Durchschnitt eine Woche. Von den Pflanzen wurden Graphitstiftzeichnungen mit Licht und Schatten angefertigt, die Farben durch Zahlen von 1 bis 140 verschlüsselt am Rand des jeweiligen Pflanzenteils notiert. In späteren Jahren verwendete Ferdinand Bauer noch wesentlich genauere Farbcodes von 1 bis 999. Als letztes erfolgte die Ausführung der Wasserfarbenmalerei und die Beschriftung mit dem Pflanzennamen. Ausführlich wird die komplizierte Herstellung der Pigmente beschrieben. Ein Beispiel: „Der Rothspahn wird mit ein wenig Alaune und Gummi Arabicum in Wasser gekocht, bis es eine dunkelrothe Farbe gibt.“

Die Brüder arbeiteten jeweils bis zu ihrem Weggang aus der Heimat an dem Florilegium: Joseph bis 1781, Ferdinand bis 1786 und Franz bis 1788. Andere Illustratoren, Jacob Walter und Stanislaus Figenschuh, brachten das Werk schließlich zu Ende, erreichten allerdings nicht die Qualität der Bauers. Zum Codex Liechtenstein wurde das Werk, als ▶

Boccius es dem Fürsten von Liechtenstein schenkte, der im Gegenzug das Spital unterstützte.

Die einzige zeitgenössische Beschreibung des Codex Liechtenstein, im Tagebuch von John Sibthorp (1758–1796, Professor der Botanik an der Universität Oxford), preist das Werk bereits in den höchsten Tönen: „Die Sammlung von Boccius … ist die herrlichste derartige Arbeit, die vielleicht existiert, … und die Doldenblütler werden wahrscheinlich hinsichtlich der Genauigkeit und Eleganz der Zeichnung unerreicht bleiben."

Seit der Fertigstellung um 1805 aufbewahrt in der Fideikommissbibliothek der Fürsten von Liechtenstein in Wien, wurde der Codex 1944 zunächst zusammen mit dem immensen Kunstbesitz der Familie Liechtenstein in Bergwerken im Salzkammergut ausgelagert und gelangte 1945 über die Insel Mainau und Bregenz nach Liechtenstein. Heute wird er im katastrophensicher ausgebauten Bergfried des Schlosses von Vaduz aufbewahrt; bisher ist er nicht ausgestellt worden, und seine wissenschaftliche Bearbeitung steht noch aus.



Indisches Blumenrohr (*Canna indica*)

Im vorliegenden Band sind aus dem umfangreichen Werk 75 Pflanzenabbildungen, 13 Titelblätter, einige Gebäude, Gartenansichten und Landschaftsbilder zu finden. Die in einem vorzüglichen Druck wiedergegebenen Pflanzenabbildungen machen dieses Buch zu einem Prachtband. Der exzellente 120-seitige Textteil stellt die Entstehung des Werkes in einen breiten kulturhistorischen Rahmen.

Das Buch ist eine bibliophile Kostbarkeit, zu der man dem Autor und dem Verlag gratulieren kann und die man sich leisten sollte!

Claudia Erbar

Die Rezensentin ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und außerplanmäßige Professorin am Institut für Systematische Botanik und Pflanzengeographie der Universität Heidelberg.



FINANZMATHEMATIK

Nicolas Bouleau

Glück und Strategie auf Finanzmärkten

Aus dem Französischen von Peter Hiltner.
Birkhäuser, Basel 2000. 208 Seiten, DM 58,–

Die Mathematik hat auf den Finanzmärkten einen spektakulären Einzug gehalten und spielt heute im Risiko-Management der Banken eine entscheidende Rolle.

Worum geht es dabei? Nicht um eine Vorhersage darüber, ob dieser oder jener spezielle Kurs steigen oder fallen wird. Das mögen andere Leute – mit mehr oder weniger Erfolg – versuchen. Die mathematische Modellierung geht hingegen davon aus, dass es nicht möglich ist, sichere Gewinne – so genannte Arbitrage-Gewinne – zu machen; dieses No-Arbitrage-Prinzip ist sogar der Angelpunkt der modernen Finanzmathematik.

Wenn die Mathematik einen also nicht unmittelbar reich machen kann – wozu taugt sie dann? Die Antwort wirkt auf den ersten Blick bescheiden: So erhält man eine Aussage über den Preis einer Option auf eine Aktie im Verhältnis zum Preis der Aktie selbst. Für diese Theorie der Optionspreisbewertung haben Robert C. Merton und Myron S. Scholes 1997 den Wirtschaftsnobelpreis erhalten (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 24). Inzwischen gehen die Anwendungen dieser Theorie weit über dieses Beispiel hinaus.

Die verwendeten Methoden sind keineswegs elementar. Wer die Resultate dieser Theorie intuitiv verstehen will, muss zuvor das Konzept eines stochastischen (das heißt vom Zufall abhängigen) Prozesses erfassen. Bisher gibt es kaum Bücher, die diese Thematik einem breiteren Leserkreis näher zu bringen versuchen.

Es ist daher erfreulich, dass sich mit Nicolas Bouleau ein Mathematiker dieser Aufgabe stellt, der in der Finanzmathematik als Forscher aktiv ist. Der französische Originaltitel, der als „Martingale und Finanzmärkte" zu übersetzen wäre, beschreibt das Thema wesentlich treffender als der eher glücklos gewählte deutsche Titel. Ein „Martingal" ist die mathematische Beschreibung eines fairen Spiels, und dieser Begriff spielt eine zentrale Rolle für die Theorie: Das „Fundamental Theorem of Asset Pricing" besagt, dass ein Spiel ohne Arbitrage-Möglichkeiten durch eine geeignete Änderung der Wahrscheinlichkeits-Gewichte zu einem fairen Spiel – also zu einem Martingal – wird. Dieser mathematische Satz, der auch eine interessante intuitive Interpretation zulässt, schlägt eine Brücke zwischen dem ökonomisch intuitiven No-Arbitrage-Prinzip und der Theorie der Martingale.

Finanzmathematik macht einen nicht reich – nicht unmittelbar

Nach einem bekannten Ausspruch von Albert Einstein soll man alles so einfach wie möglich erklären – aber nicht einfacher! Der Autor bemüht sich redlich, dem ersten Teil dieser Forderung zu entsprechen und die grundlegenden Ideen allgemein verständlich zu entwickeln. Der Idee des „Hedgens" einer Option wird breiter Raum eingeräumt; dieser neu-deutsche Ausdruck für das Absichern einer Option ist inzwischen allgemein üblich und treffender als die im Buch verwendete, wörtlich aus dem Französischen übernommene Übersetzung „Deckung einer Option".

Der Autor beschreibt die Konzepte, indem er zunächst mathematische Begriffe und Formeln so lange wie möglich vermeidet; und das ist gut so. Dann allerdings kommt der Punkt, an dem es ohne die mathematischen Konzepte nicht mehr geht – und an dieser Stelle lässt der Autor sie ohne weitere Erklärung einfach vom Himmel fallen. Dadurch bleibt die Darstellung zwar kompakt, jedoch um den Preis, dass ein Laie keine Chance hat, die entsprechenden Passagen zu verstehen; er kann sie nur mit Staunen überlesen. Trotzdem – oder vielleicht gerade durch diese Technik des Weglassens – wird das Buch in einem bemerkenswerten Maß der schwierigen Aufgabe gerecht, die Grundideen der modernen Finanzmathematik darzustellen, ohne sich in technische Details zu verheddern.

Allerdings versteigt sich der Autor öfters zu durchaus apodiktischen Aussagen, die keineswegs dem mathematischen Grundsatz der Beweisbarkeit folgen. So bemerkt er etwa (S. 64), dass das Prinzip des Delta-Hedgens „eine direkte und systematische Besteuerung der Geschäfte unmöglich" macht. Die hier angesprochene „Tobin-Tax", eine weltweit zu erhebende Umsatzsteuer auf Finanztransaktionen, würde bei der praktischen Durchführung zweifellos auf große Schwierigkeiten stoßen. Dass sie aber „unmöglich" sei, kann daraus nicht abgeleitet werden. Jedenfalls bleibt der Autor den Beweis schuldig.

Leider macht die geradezu skandalöse Übersetzung das Lesen immer wieder mühsam. Der Übersetzer ist offenbar weder mit den mathematischen noch mit den ökonomischen Begriffen der Theorie vertraut und kommt stellenweise („Vormundschaftsbehörde" statt „Aufsichtsbehörde") der Karikatur von Computer-Übersetzungen bedenklich nahe.

Walter Schachermayer

Der Rezensent ist Professor am Institut für Statistik, Wahrscheinlichkeitstheorie und Versicherungsmathematik der Technischen Universität Wien.

BIOLOGIE



Richard Lewontin

The Triple Helix

Gene, Organism and Environment

Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts) 2000.
144 Seiten, $ 22.95



Der Harvard-Professor Richard Lewontin ist unter Evolutionsbiologen seit über 30 Jahren als kluger und streitbarer Vordenker bekannt. Seine dezidierten Ansichten hat er in zahlreichen Publikationen dargelegt: von populationsgenetischen Studien der Taufliege *Drosophila* über komplexe theoretische Arbeiten, Monografien, Lehrbücher bis hin zu kommunistisch inspirierten populären Texten wider die Ausbeutung armer Landwirte durch agrochemische Konzerne. Sein neuestes, an Laien gerichtetes Werk ist eine Sammlung von vier Aufsätzen, die dem schwer entwirrbaren Zopf (*triple helix* wie Dreifachhelix) aus Genen, Organismen und Umwelt nachspüren. Nach Lewontin bilden diese drei Elemente ein komplexes Netzwerk von Ursachen und Wirkungen, das sich dem Zugriff des modischen Reduktionismus weitgehend entzieht.

Das grundlegende biologische Phänomen, das es für Lewontin zu deuten gilt, ist die Herkunft der biologischen Vielfalt. Diese entsteht im Verlauf der Entwicklung von Individuen und ist beeinflusst durch deren Stammesgeschichte.

Lewontin beginnt mit der ersteren und hier ganz klassisch mit der Klärung des Begriffs „Entwicklung" (des Individuums). Dieser meint wörtlich das Auswickeln von etwas, das schon vorhanden ist. Überraschenderweise bestimmt der aus dem 18. Jahrhundert stammende deterministische Bedeutungskern von „Entwicklung" noch die heutige Forschungspraxis. So vertritt der bekannte Molekularbiologe Sidney Brenner die Meinung, mit ausreichender Computerkraft lasse sich aus einer Genomsequenz der zugehörige Organismus errechnen. Eine primitive Struktur, die DNA-Sequenz, wer- ▶

de nach festen Regeln in eine komplexe Struktur, den Organismus, transformiert.

„Das Problem … ist, dass es sich hierbei um schlechte Biologie handelt“, schreibt Lewontin: „Wenn wir die gesamte DNA-Sequenz eines Organismus zur Verfügung hätten und unendliche Rechenzeit, wir könnten den Organismus nicht errechnen, denn der Organismus errechnet sich selbst nicht aus seinen Genen.“ Um eine bestimmte Sprache sprechen zu können, braucht ein Mensch sowohl die richtigen Gene als auch die richtige Umgebung. Der Erfolg eines Genotyps lässt sich nicht unabhängig von der Umwelt vorhersagen. Obwohl das jeder Biologe weiß, wird der Einfluss der Umwelt auf die Entwicklung im Zeitalter der Genomsequenzierung oft vernachlässigt.

Im Gegensatz zur Entwicklungsbiologie richtet die Erforschung der Evolution (der Arten) das Augenmerk auf feine Unterschiede unter den Individuen und vor allem auf das Verhältnis von Organismus und Umwelt. Dieses ist Thema des zweiten Aufsatzes. Immer wieder ist es erstaunlich zu beobachten, wie präzise Lebewesen und ihre Umwelt zusammenpassen. Fische sind stromlinienförmig, Vögel haben leichte Knochen, und Eisbären sind weiß wie Schnee. Darwins Erklärung dafür war, dass diejenigen Organismen, die am besten an ihre Umwelt angepasst sind, die meisten Nachkommen hinterlassen und dadurch mit der Zeit die Spezies dominieren. In diesem Szenario stellt man sich die Lebewesen als Objekt einer sie beherrschenden, unveränderlichen Umwelt vor. Aber schon die Tatsache, dass der Zustand der Umwelt unter den Menschen heftig diskutiert wird, zeigt, dass das zu kurz gedacht ist.

Ökologische Nischen lassen sich nämlich immer nur im Zusammenhang mit den Lebensgewohnheiten ihrer Bewohner beschreiben. Organismen „konstruieren“ ihre Umwelt. Beim Menschen ist das unübersehbar, aber es gilt auch für andere Lebewesen: Pflanzen brechen mit ihren Wurzeln die Erde auf und erleichtern sich damit die Ausbildung weiterer Wurzeln. Aus den Wurzeln scheiden sie Stoffe aus, von denen Pilze leben, deren Stoffwechselprodukte wiederum der Pflanze nützen, und so weiter. Diese Überlegungen gipfeln in Lewontins These, nicht der Phänotyp, sondern die Umwelt eines Organismus sei in seinem Genom codiert. Das ist zwar überspitzt formuliert, aber ein hilfreicher Hinweis darauf, dass der Begriff der ökologischen Nische problematisch ist. Wenn es eine unendliche Anzahl von Möglichkeiten gibt, die Umwelt in „Nischen“ zu zerlegen, und wenn Lebewesen ihre Umwelt selbst verändern, in welchem

Sinne kann dann von Anpassung an eine bestimmte Nische die Rede sein?

Im dritten Teil geht es um das Verhältnis von Ursache und Wirkung in der Biologie. Pflanzen und Tiere sind durch ausgeklügelte Regulationsmechanismen gegen Schwankungen in der Außenwelt gepuffert. Wenn es heiß ist, schwitzen wir und kühlen dadurch unseren Körper auf 37 Grad. Um ein derartiges System experimentell zu untersuchen, pflegt man es so stark zu stören, dass sich reproduzierbare Reaktionen einstellen. Die Kausalketten, die durch die experimentelle Rosskur aufgedeckt werden, müssen nicht unbedingt dieselben sein, die im Normalzustand des Systems wichtig sind.

Damit hat Lewontin an einem einleuchtenden Beispiel die Unfruchtbarkeit eines radikalen Reduktionismus belegt. Der Gegenpol, ein selbstgefälliger Holismus, ist nicht besser. Im letzten Teil des Buches weist Lewontin einen dritten Weg auf: das Studium von makromolekularen Strukturen, also von Enzymen, Enyzmkomplexen, dem Cytoskelett und so weiter. Hier gebe es Hoffnung, durch genaues Beobachten tatsächlich solche molekularen Unterschiede zu finden, die für das Funktionieren des Organismus eine wichtige Rolle spielen.

Als Beleg zieht Lewontin eine alte Beobachtung aus der Populationsgenetik heran: Der genetische Code ist redundant, das heißt, mehr als ein Codon (Basentriplett) steht für eine der zwanzig Protein bildenden Aminosäuren. Folglich verändern manche Mutationen die Aminosäuresequenz eines Proteins, andere aber nicht. Nun waren die allermeisten Mutationen, die sich im Verlauf der Evolution durchgesetzt haben, von der zweiten Art, also auf der Proteinebene wirkungslos. Demnach sind am Selektionsfilter fast nur solche Genotypen vorbeigekommen, die den – aus Proteinen aufgebauten – Phänotyp unverändert lassen. Das bedeutet im Rückschluss, dass fast jede Abweichung in der Sequenz eines Proteins die Fitness des Organismus beeinträchtigt. Genaue Untersuchungen von Proteinstrukturen und wie diese sich auf das Verhalten des Gesamtorganismus auswirken, sind deshalb für Lewontin der beste Weg, den adaptiven Unterschieden zwischen den Lebewesen auf die Schliche zu kommen. Dabei gibt es für ihn „keinen Ersatz für direkte Beobachtung“.

„Nicht der Phänotyp, sondern die Umwelt ist in den Genen codiert“

Wie Lewontin selbst sagt, enthält *The Triple Helix* keine neue Biologie. Vielmehr macht sie auf die Hauptimplikation alter Erkenntnisse aufmerksam: Lebewesen sind kompliziert, und Fundamentalreduktionismus wird vielen ihrer Eigenschaften nicht gerecht. Ganz nebenbei weist Lewontin auch darauf hin, dass bei allem Staunen über die Sequenzierleistungen der letzten Jahre interessante Biologie zunächst ein intellektuelles und kein technisches Problem ist. Weit davon entfernt, der archimedische Punkt aller biologischen Forschung zu sein, ist die Doppelhelix eng in die *Triple Helix* aus Gen, Organismus und Umwelt eingeflochten.

Hier wird elegant formulierte Biologiekritik von einem Biologen geübt, der seine Polemik durch ein Lebenswerk hochangesehener Forschung unterstützen kann.

Bernhard Haubold

Der Rezensent ist Bioinformatiker am Max-Planck-Institut für Chemische Ökologie in Jena.



Gegenwindschiffe

Kann ein windgetriebenes Schiff direkt gegen den Wind fahren? Ja, sogar doppelt so schnell, wie der Wind weht – theoretisch.

VON WOLFGANG BÜRGER

GRAFIK: AXEL WEIGEND

Kreuzen im Gegenwind: Segelschiffe können nicht auf direktem Kurs gegen den Wind segeln, aber gegen den Wind kreuzen. Moderne Rennyachten schneiden den Wind unter einem Winkel von weniger als 40 Grad. Die schnellen Teeklipper, die im 19. Jahrhundert die Tee-Ernte von China nach England zu befördern hatten, waren ihnen darin noch weit unterlegen. Nach historischen Analysen ihrer Kurse kreuzten sie den Gegenwind unter 60 Grad; sie mussten also, von den Wendekurven abgesehen, zwei Seemeilen im Zickzack fahren, um eine Seemeile gegen den Wind voranzukommen. Zwar leistet die Natur die Mehrarbeit des Windes am Schiff gegen den Widerstand des Wassers zum Nulltarif, aber längere Wege bedeuten längere Fahrzeiten und damit höhere Betriebskosten, und das häufige Umsetzen der Segel beim Kreuzen erfordert eine zahlreiche Mannschaft. Soll in Zeiten der Teuerung fossiler Brennstoffe die Windkraft zum Massengütertransport wieder wirtschaftlich werden, müssen sich die Wendemanöver vereinfachen lassen und möglichst automatisch ablaufen, damit Windschiffe mit kleiner Besatzung auskommen.

Windmühlenschiffe: Die auf ein Segel wirkende Windkraft hat keinen Anteil, der direkt gegen den Wind gerichtet ist. Zum Segeln am Wind muss deshalb das Wasser durch Kräfte auf den Rumpf des Schiffes zum Antrieb beitragen. Bei Booten mit geringem Tiefgang greifen diese Kräfte im Wesentlichen an einem starren Unterwasserflügel an, dem „Schwert“.

Die Kräfte des Windes auf das Segel und des Wassers auf das Schwert lassen sich durch die Wirkung eines Windrads und einer von ihm angetriebenen Wasserschraube ersetzen, die das Schiff direkt gegen den Wind zieht. Gegenüberliegende Blätter des Windrads stehen spiegelbildlich zueinander wie beim Kreuzen in regelmäßiger Folge nacheinander die Segel eines Segelschiffs. Ähnlich ersetzen die Schaufeln der Wasserschraube das Schwert. Mit Windmühlenantrieb kann ein Schiff in jede Richtung fahren, auch direkt ins Auge des Windes.

Schon 1712 hatte ein Herr Duquet in Frankreich diese Idee. In der napoleonischen Zeit planten die Franzosen, eine schwimmende Festung mit drei Windrädern zum Antrieb von vier Schaufelrädern auszurüsten, um 60 000 Soldaten mit 600 Kanonen zur Invasion nach England überzusetzen. Wie wäre wohl die Weltgeschichte weitergegangen, wenn die Idee damals Erfolg gehabt hätte?

Dieses Gegenwindboot – aufs Grundsätzliche reduziert – ist mit einer Länge von 60 Zentimetern ein verkleinerter Nachbau von Blackfords funktionstüchtigem Modell. Wind von rechts im Bild treibt die Luftschraube und über die gemeinsame Drehachse auch die Wasserschraube an, die den Katamaran gegen den Wind zieht.



WOLFGANG BÜRGER / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Windräder … Welche Leistung führt der Wind mit sich, und welchen Teil kann ihm ein Windrad zu seinem Antrieb entziehen? In seinem 1926 erschienenen Büchlein über „Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen“, das erst kürzlich wieder nachgedruckt wurde, leitete Albert Betz, der Leiter der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen, aus einer einfachen Strahltheorie des Propellers ab, dass ein Windrad gleich welcher Bauart höchstens 16/27 (ungefähr 59 Prozent) von dem Energiestrom des Windes ernten kann, der ohne Windrad durch die von seinen Flügeln überstrichene Fläche fließen würde (siehe Kasten rechts).

Windrad-Theorie

Wie viel Energie gibt der Wind her?

Beim Antrieb eines Windrads verliert der Wind einen Teil seiner Bewegungsenergie. Die Geschwindigkeit des Luftstrahls durch das Windrad, dessen Schraubenpropeller einen Kreis der Fläche A senkrecht zum Wind überstreicht, nimmt daher von ihrem Wert v_1 weit vor dem Windrad über eine noch unbekannte Geschwindigkeit v in der Ebene des Windrads bis zu einem kleineren Wert v_2 eine Strecke hinter dem Windrad ab. Vor dem Windrad staut sich der Wind und wird stetig langsamer. Nach der sprunghaften Abnahme des Drucks im Windrad nimmt die Windgeschwindigkeit hinter dem Windrad unter Druckanstieg stetig weiter ab. Bei den hier betrachteten geringen Strömungsgeschwindigkeiten verhält sich Luft inkompressibel: Die Dichte ρ bleibt konstant, aber der Druck ändert sich mit der Geschwindigkeit. Da der Massenstrom $Q = \rho A_1 v_1 = \rho A v = \rho A_2 v_2$ in allen Querschnitten gleich ist, muss sich der Strahl vom Querschnitt A_1 weit vor bis zum Querschnitt A_2 weit hinter dem Windrad stetig verbreitern.

Die Windkraft F auf den Propeller ergibt sich aus dem Überschuss des pro Zeiteinheit zufließenden über den in der gleichen Zeit abfließenden Impulsstrom der Luft zu $F = Q(v_1 - v_2)$. Die Leistung P des Windes am Windrad lässt sich auf zwei Weisen berechnen: als Leistung $P = Fv$ der Windkraft am Propeller und, unter Voraussetzung verlustfreier Strömung, als Überschuss $P = Q(v_1^2/2 - v_2^2/2)$ der zufließenden über die abfließende Bewegungsenergie pro Zeit. Setzt man die Leistungen gleich, kann man die noch unbestimmte Geschwindigkeit v am Windrad durch die Geschwindigkeiten der An- und Abströmung ausdrücken, $v = (v_1 + v_2)/2$, und die Leistung in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis $\xi = v_2/v_1$ in der Form

$$P = \frac{\rho A v_1^3}{4}(1-\xi)(1+\xi)^2$$

darstellen. Der Vorfaktor ist durch den Querschnitt A des Windrades und die Windgeschwindigkeit v_1 vorgegeben. Die Leistungsausbeute ist also proportional der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit! Durch geeignete Bauart des Windrades lässt sich seine Leistung optimieren, wenn die vorliegende Analyse auch keinen Hinweis zur konstruktiven Realisierung gibt. Das Maximum der Leistung, das man durch Nullsetzen der Ableitung findet, liegt beim Wert $\xi = 1/3$ und beträgt $P_{\text{opt}} = (16/27)P_1$ oder 59 Prozent des ankommenden Energiestroms $P_1 = \rho A v_1^3/2$ des Windes, der ohne die Störung vom Windrad durch den Querschnitt A fließen würde. Die Windkraft hat unter diesen Bedingungen den Wert $F_{\text{opt}} = (4/9)\rho A v_1^2$.

Wenn ein Gegenwindschiff dem Wind mit der Geschwindigkeit u entgegenfährt, wird das Windrad mit der Geschwindigkeit $u + v_1$ angeströmt. Bei optimaler Auslegung des Windrads gibt der Wind die Leistung P_L (Index L für Luft) ab und drückt mit der Kraft F_L auf die Ebene des Windrades:

$$P_L = \frac{8}{27}\rho_L A_L (u+v_1)^3 = \frac{2}{3}(u+v_1)F_L.$$

Für die zwangsläufig mitbewegte Wasserschraube (Index W für Wasser) gilt dagegen

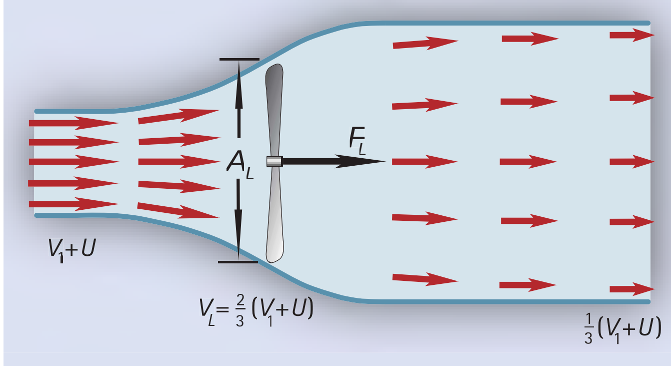
$$P_W = -\rho_W A_W w \left(u + \frac{w}{2}\right)^2 = \left(u + \frac{w}{2}\right) F_W.$$

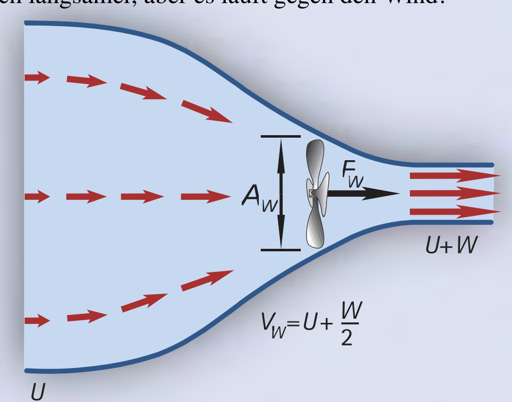
Die Wasserschraube arbeitet als Turbine zum Antrieb des Schiffes und gibt daher als Arbeitsmaschine Leistung ab (negatives Vorzeichen). Sie nimmt ruhendes Wasser auf und beschleunigt es auf die Geschwindigkeit w. Vom bewegten Schiff aus gesehen, kommt das Wasser mit der Geschwindigkeit u an und strömt mit $u + w$ wieder ab.

Im günstigsten Fall, der hier vorausgesetzt wird, gibt das Windrad die gesamte aufgenommene Leistung an die Wasserschraube ab: $P_L + P_W = 0$. Wenn der Wasserwiderstand des Schiffes so klein gegen die Kräfte am Segel und an der Wasserschraube ist, dass er in der Bilanz vernachlässigt werden darf, besteht Gleichgewicht der Kräfte des Windes und des Wassers: $F_L + F_W = 0$. In dieser Näherung lässt sich die Geschwindigkeit w aus den Gleichungen eliminieren und die Schiffsgeschwindigkeit, mit der Abkürzung $q = \rho_L A_L/(\rho_W A_W)$, durch die Windgeschwindigkeit darstellen:

$$u = \frac{2-q}{1+q} v_1$$

Wegen des großen Dichteunterschieds von Luft und Wasser ist der Parameter q klein verglichen mit 1. Für Blackfords Modell liegt q unter 0,02. Verlustfrei kann ein Gegenwindschiff nicht schneller als mit doppelter Windgeschwindigkeit gegen den Wind fahren. Wegen der Verluste und Widerstände ist es deutlich langsamer, aber es läuft gegen den Wind!





THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

… und Schiffe: Zum Antrieb eines Schiffes lässt sich ein solches „optimales“ Windrad an eine Wasserschraube koppeln. Es kann günstigstenfalls mit doppelter Windgeschwindigkeit gegen den Wind laufen, der es antreibt, nämlich dann, wenn weder Energieverluste im Antrieb noch der Schiffswiderstand seine Leistung mindern. Aus physikalischer Sicht erscheinen Gegenwindschiffe demnach möglich.

Zur Praxis: Nach einem Bericht in der Rubrik „The Amateur Scientist“ des Scientific American vom Dezember 1975 waren Peter Kauffman und Eric Lindahl in Seattle die Ersten, die ein Modell eines Gegenwindschiffs bauten und damit die Realisierbarkeit der Idee praktisch nachwiesen. Um ein Leistung verzehrendes Getriebe zu vermeiden, setzten sie Windrad und Wasserschraube auf ein und dieselbe schräg liegende Drehachse und bauten das Schiff zur Verringerung des Wasserwiderstands als leichten Katamaran. B. L. Blackford, der im „American Journal of Physics“ 1978 die Betzsche Theorie auf diesen Typ Gegenwindschiff anwandte, benutzte einen kommerziellen Katamaran von 4 Metern Länge und 2 Metern Breite mit einer zweiflügeligen Luftschraube von 3,05 Metern und einer Wasserschraube von 0,90 Metern Durchmesser. In Leistungstests, über die Blackford 1980 berichtete, erreichte das Schiff auf Gegenwindkurs beachtliche 30 Prozent der Windgeschwindigkeit. Die schräg liegende Drehachse erwies sich als nachteilig, weil die Wasserschraube den Katamaran nicht nur vorwärts, sondern auch abwärts zog, wodurch das Modell zu halben Saltos nach vorn neigte.

Aus neuerer Zeit gibt es zahlreiche Berichte über funktionstüchtige Windmühlenschiffe. Die Zeitschrift „Yacht“ berichtete 1980 über „Eolien“, eine auf dem Mittelmeer kreuzende Windmühlen-Jolle von 5,11 Metern Länge mit einem zweiflügligen Windrad von 5 Metern Durchmesser, die ihr Drehmoment bei 5 Umdrehungen pro Sekunde über ein Getriebe auf eine Wasserschraube übertrug und bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit eine Leistung von 4,5 PS brachte.

Wie wird die Geschichte weitergehen? In dem Buch „Windschiffe“ von 1990 schwelgen die Autoren Helmut Risch und Jochen Berthold in fantastischen Spekulationen über die Zukunft großer Windschiffe für den Personen- und Güterverkehr. Viele Ideen sind verlockend und erscheinen technisch möglich. Ob sie sich durchsetzen können, ist weniger eine technische als eine wirtschaftliche Frage. ■

Wolfgang Bürger ist Physiker und Professor an der Universität Karlsruhe. Seine besondere Neugier gilt physikalischen Spielzeugen.

Literaturhinweise

Windschiffe. Von Helmut Risch und Jochen Berthold. VEB Verlag Technik, Berlin ³1990.

Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Von Albert Betz. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1926.

The Physics of a Push-Me-Pull-You Boat. Von B. L. Blackford in: American Journal of Physics, Bd. 46, Nr. 10, S. 1004, (1978).

The Amateur Scientist, Scientific American, Bd. 233, Nr. 12, S. 120, (1975).

PREISRÄTSEL

Fair play?

von Reinhard Schmidt

Achim und Britta werfen viele Male hintereinander eine faire Münze und schließen Wetten auf die Folge der Ergebnisse ab: Achim sagt eine Folge von drei Ereignissen an, zum Beispiel Zahl, Zahl, Zahl, und Britta daraufhin eine beliebige andere Dreierfolge. Wessen Folge im Spielverlauf zuerst auftritt, der bekommt die Münze.

Ist das Spiel fair? Wenn ja, warum? Wenn nein, warum nicht?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn CD-Roms „Bauen im Licht“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. April 2001, eingehen.

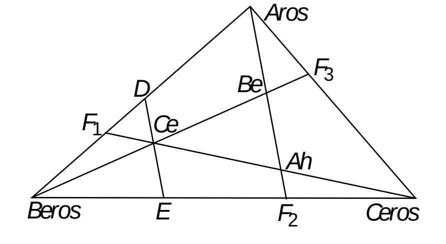
Lösung zu „Das Bermuda-Dreieck“ (Februar 2001)

Einen von vielen richtigen Wegen schlug Joachim Estel aus Spalt ein:

Er drittelte mit Zirkel und Lineal sämtliche Seiten des Dreiecks *ArosBerosCeros* und verband die so gefundenen Punkte F_1, F_2 und F_3 mit den jeweils gegenüberliegenden Ecken des Bermuda-Dreiecks (rechts). In der Mitte entsteht das gesuchte Dreieck der Leuchtfeuer von *Ah*, *Be* und *Ce*. Warum?

Es genügt zu zeigen, dass F_2, diesmal definiert als der Schnittpunkt von *BerosCeros* mit der Peillinie *ArosAh*, die Strecke *BerosCeros* drittelt. Diese Überlegung ist dann für alle Seiten des Bermuda-Dreiecks anzustellen.

D sei der Mittelpunkt der Strecke *ArosBeros*; E sei der Schnittpunkt der Geraden *BerosCeros* und *DCe*. Dann gilt $\overline{BerosCe}=\overline{CeBe}$ nach Voraussetzung der Aufgabe und $\overline{BerosD}=\overline{DAros}$ nach Konstruktion. Nach der Umkehrung des Strahlensatzes müssen dann *DE* und *ArosF*$_2$ parallel sein. Aus dem Strahlensatz folgt dann $\overline{BerosE}=\overline{EF_2}$. Andererseits gilt auch $\overline{CerosAh}=\overline{AhCe}$ (nach Voraussetzung der Aufgabe) und damit (Strahlensatz) $\overline{EF_2}=\overline{F_2Ceros}$, was zu beweisen war.



Die Gewinner der zehn Armbanduhren „Komet“ sind Martin Gaal, Graz; Hartmut Fenner, Hamburg; Claus Meyer, Göttingen; Wolfgang Meier, Bochum; Hans Schick, Rotenburg; Joachim Estel, Spalt; Bettina Wiercioch, Gelsenkirchen; Ilse Benz, Heidenheim; Herbert Sanders, Dinslaken; und Korbinian Gaigl, Landshut.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser neues Wissenschaftsportal Wissenschaft Online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Flüssigkristall-Bildschirme

Tragbare Computer erfordern kompakte und leichte Bildschirme, Flüssigkristall-Displays (Liquid Crystal Displays, LCDs) haben sich dafür als Standard etabliert. Diese organischen Kristalle sind transparent, können aber die Orientierung von polarisiertem Licht ändern, sodass es einen Filter passieren kann – der Bildpunkt erscheint hell – oder eben nicht – der Bildpunkt bleibt dunkel.

Zwei Glasplatten, dazwischen die Flüssigkristalle, auf der Innenseite transparente Elektroden, das ist der Grundaufbau eines solchen Monitors. Bei Farbbildschirmen kommen Rot-, Grün- und Blau-Filter hinzu; durch additive Mischung entsteht die gewünschte Farbe eines Bildpunkts.

Die Anordnung wird von hinten beleuchtet. Ein Polarisationsfilter auf der Außenseite der ersten Glasplatte lässt nur Lichtwellen mit einer senkrechten Orientierung in die Flüssigkristallschicht eintreten. Hauchfeine Rillen auf der Glasinnenseite haben die Kristallmoleküle so ausgerichtet, dass sie die Polarisationsrichtung der Wellen um 90 Grad drehen. Das entspricht genau der Durchlassrichtung eines weiteren Filters auf der Außenseite der vorderen Glasplatte. Das Licht kann passieren – der Bildpunkt (Pixel) erscheint hell. Wird hingegen ein elektrisches Feld angelegt, richten sich die Kristalle so aus, dass die Orientierung der Lichtwelle erhalten bleibt, der vordere Polarisationsfilter sperrt, und der entsprechende Bildpunkt bleibt dunkel.

Andere Flüssigkristalle arbeiten gerade umgekehrt: Das elektrische Feld dreht sie und schaltet den Bildpunkt hell. Diese Technik ist aber weniger verbreitet.

Diese Ansteuerung eines Rasters (Matrix) von Pixeln kann auf zwei Weisen erfolgen. Von passiven Displays spricht man, wenn die eigentlichen Steuerelemente außerhalb der Glasplatte liegen, innerhalb befindet sich ein Elektrodengitter. Wird an eine bestimmte Zeile und Spalte davon Spannung angelegt, erzeugt genau ein Kreuzungspunkt des Gitters ein elektrisches Feld und schaltet somit den zugehörigen Bildpunkt dunkel. Um ein komplettes Bild auf dem Schirm zu erzeugen, müssen also alle Pixel nacheinander angesteuert werden. Das erfordert Flüssigkristalle, die sozusagen träge genug sind, in dieser Zeit nicht von selbst wieder in ihre Ausgangslage zurückzukehren.

Schneller und eleganter arbeiten so genannte Aktivmatrizen, denn dort steuert jeweils ein Transistor ein Pixel direkt an. Der Bildaufbau geht rascher vonstatten, und schnellere Flüssigkristalle sind verwendbar. Die Schaltelemente werden in Dünnschichttechnik auf der hinteren Glasplatte aufgebracht (Thin Film Transistor, TFT). Für flache Farbbildschirme von Desktop-Computern mit einer Auflösung von 1024 mal 768 Punkten sind dann 2 359 296 Transistoren erforderlich. Diese Technik hat sich heute weitgehend durchgesetzt. ■

Der Autor ***Samuel Musa*** *ist Geschäftsführer des Zentrums für Displaytechnik und -herstellung der Universität Michigan in Ann Arbor.*

Wie Kräfte des Erdinneren die Kontinente verbeulen

Gewaltige Strömungen tief im Globus schieben nicht nur Bruchstücke der Erdkruste wie Treibgut umher – sie heben und senken auch ganze Kontinente.

Anolis-Echsen

Die Evolution wiederholt sich. Auf jeder großen Antillen-Insel leben andere Arten von Saumfinger-Echsen. Doch die Spezialisten ähneln sich von Insel zu Insel verblüffend.



Vielseitige Kunsthand

Karlsruher Wissenschaftler entwickelten einen neuartigen Handersatz, bei dem Druckluft in Kunststofffinger geblasen wird – flexibel, sensorgesteuert und mit bisher unerreicht niedrigem Gewicht.



Weitere Themen im Mai

Gravitationslinsen

Die Ablenkung des Lichts ferner Sterne durch kosmische Massen enthüllt neue Details von Galaxien und Quasaren. Der Linseneffekt hilft insbesondere bei der Suche nach dunkler Materie im All.

Putzteufel in Zellen

„Proteasomen" schlucken und zerhacken überflüssige und verkehrte Moleküle. Auch zeigen sie dem Immunsystem kranke Zellen. Diese Aufräumkommandos gezielt zu lenken, könnte zur Therapie von Krankheiten verhelfen – von Krebs über Parkinson bis zu Aids.

Die Indianer von La Florida



Wie sehr die Ureinwohner des früheren Spanisch-Florida unter dem Joch der europäischen Eroberer litten, davon zeugen ihre Knochen. Die Bioarchäologen dokumentieren die Krankheiten, die Mangelernährung und harte Arbeit verursachten.